

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE  
M. Sc. A.

PAR  
Julien TROCHU

MODÈLE DE PLANIFICATION TACTIQUE DE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT  
SOUMISE À DES RÉGULATIONS ENVIRONNEMENTALES

MONTREAL, LE 1<sup>er</sup> JUIN 2015

©Tous droits réservés, Julien TROCHU, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Chaabane Amin, directeur de mémoire  
Département de Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Ouhimou Mustapha, codirecteur de mémoire  
Département de Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Lapalme James, président du jury  
Département de Génie logiciel et des technologies de l'information à l'École de technologie supérieure

M. Paquet Marc, membre du jury  
Département de Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 5 MAI 2015**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux superviseurs messieurs Amin Chaabane et Mustapha Ouhimmou, qui ont su me guider à travers cette initiation de deux ans à la recherche et sans qui je n'aurais pas cette chance d'approfondir mes connaissances quotidiennement dans un domaine qui me passionne. Aussi je les remercie pour leur soutien financier permanent ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont accordée depuis le début de notre collaboration.

Un grand merci également aux membres de mon laboratoire de recherche Numérix, grâce à qui la bonne humeur vient se mêler à une ambiance de travail parfois intense et m'auront permis de temps à autres de trouver quelques instants de répit au cours de longues journées de travail et de concentration. Un merci tout particulier à Marthy Garcia Alvarado avec qui je partage ce laboratoire depuis plusieurs années, et qui par son expérience aura su m'apporter l'aide ou les conseils dont j'ai pu avoir besoin à des moments clés de ma recherche.

Je suis également reconnaissant envers ma famille et mes amis restés en France, pour leur soutien concernant mon parcours et leur présence malgré la distance et le décalage horaire qui rendent parfois les communications moins évidentes. J'adresse un clin d'œil spécial à Marc et Anthony Guillaumin, pour leur humour singulier qui auront su me changer les idées durant mes quelques moments de détente.

Je dédie ce travail à ma femme Charline, que je tiens à remercier pour sa patience et sa compréhension concernant un parcours académique de longue durée. Aussi je lui suis reconnaissant pour son esprit ouvert au sujet de mon ambition de carrière professionnelle dans le domaine de la recherche, ayant choisi de m'accompagner tout au long de ce processus d'immigration afin de me permettre de poursuivre mes études dans de bonnes conditions au sein de l'école de technologie supérieure (ÉTS) et de cette ville accueillante qu'est Montréal.









# **MODÈLE DE PLANIFICATION TACTIQUE DE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT SOUMISE À DES RÉGULATIONS ENVIRONNEMENTALES**

Julien TROCHU

## **RÉSUMÉ**

La problématique environnementale étant mise en avant lors des dernières décennies, la gestion de la chaîne d'approvisionnement devient de plus en plus complexe. Les grandes chaînes logistiques étant des acteurs majeurs du réchauffement climatique et des dommages causés à notre environnement, les entreprises concernées se retrouvent au centre de la polémique et de plus en plus elles doivent rendre des comptes au gouvernement ainsi qu'à leurs consommateurs. On utilise communément le terme de chaîne logistique durable lorsque les traditionnelles considérations économiques sont élargies aux dimensions environnementales et sociales, représentant ainsi un équilibre permettant à une activité industrielle de perdurer dans le temps sans causer de dommage à son entourage. C'est dans cette logique que s'inscrit ce travail de recherche, visant en particulier deux réglementations environnementales d'actualité pour les entreprises Québécoises : les limitations relatives aux émissions de gaz à effet de serre et le principe de compensation aux services de collecte.

Dans ce travail nous avons mis en place un modèle d'optimisation linéaire permettant d'analyser les décisions tactiques d'approvisionnement en composants éco-conçus versus standards chez différents fournisseurs. Aussi la formulation mathématique utilisée permet d'évaluer le plan optimal de production aux usines manufacturières au moyen de deux technologies distinctes : standard versus propre. Le raisonnement appliqué suit trois étapes principales : tout d'abord une résolution préliminaire permet d'établir le plan optimal d'approvisionnement et de production dans le cas où l'entreprise étudiée n'est pas encore assujettie aux lois environnementales. Par la suite les simulations réalisées permettent de tester ce plan optimal lorsqu'il est soumis tout d'abord à une seule puis aux deux législations mentionnées plus haut simultanément. Si dans un premier temps nous privilégions les données réelles en vigueur actuellement dans la province du Québec, la suite de notre étude admet l'hypothèse que ces récentes réglementations vont être renforcées dans les prochaines années. Ainsi nous analysons les éventuelles conséquences d'un durcissement des législations sur le plan tactique optimal d'approvisionnement et de production de notre chaîne logistique.

**Mots clés :** Chaîne d'approvisionnement durable, réglementations environnementales, gaz à effet de serre, principe de compensation, approvisionnement, production, optimisation, planification tactique.



# **TACTICAL PLANNING MODEL FOR SUPPLY CHAIN UNDER ENVIRONMENTAL REGULATIONS**

Julien TROCHU

## **ABSTRACT**

Environmental issues being highlighted during the last decades, supply chain management is becoming increasingly complex. Large supply chains are major players of global warming and damage caused to our environment. Thus some companies are at the center of controversy and they are increasingly held accountable to the government and their consumers regarding their environmental behavior. Nowadays we use the terms sustainable supply chain when traditional economic considerations are extended to environmental and social dimensions, thus representing a balance allowing industrial activity to persist over time without causing any damage to its environment. This is the point of this research work, analyzing especially two current environmental regulations targeting Quebec companies: the greenhouse gases emissions limitations instituted by the recent carbon market system, voted in 2012 and effective since 2013, and the collect services compensation principle.

In this work we elaborate a linear optimization model to analyze supply chain tactical decisions allowing choosing between standard versus eco designed components from different suppliers. Also the mathematical formulation is used for assessing the optimal production plan choosing among two distinct technologies to assemble the final product at the manufacturing plants: the standard one versus the green one. In this work we follow three main stages: first a preliminary resolution allows determining the optimal plan regarding supply chain's procurement and production decisions in case the company studied is not yet subject to environmental laws. Eventually the company will be subject to one and then both regulations simultaneously. If at first we focus on real data currently effective in the province of Quebec, the last step of our study admits the hypothesis that these recent regulations will be strengthened in the coming years. Thus we analyze the possible consequences on the optimal tactical procurement and production plan.

**Keywords:** Sustainable supply chain, environmental regulations, greenhouse gases, compensation scheme, procurement, production, optimization, tactical planning.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE .....	5
1.1 Définition de la problématique .....	5
1.2 Démarche de résolution proposée .....	6
CHAPITRE 2 MISE EN CONTEXTE DU PROBLEME ÉTUDIÉ .....	9
2.1 Introduction sur la prise de conscience environnementale de l'industrie .....	9
2.2 Les principales incitations au changement .....	11
2.2.1 Satisfaction d'une classe émergente de consommateurs .....	11
2.2.2 Avantage compétitif .....	12
2.2.3 Réputation de l'entreprise .....	12
2.2.4 Pression des groupes environnementaux .....	13
2.2.5 Réponse aux pressions des actionnaires .....	13
2.2.6 Respect du cadre légal .....	14
2.3 La loi sur la compensation aux services de collecte au Québec .....	16
2.3.1 Mise en place de la législation .....	16
2.3.2 RECYC QUÉBEC et Éco-Entreprise Québec (ÉEQ) .....	16
2.3.3 Fonctionnement du principe de compensation .....	17
2.3.4 Impact sur les entreprises québécoises .....	20
2.4 Le Système québécois de Plafonnement et d'Échange des Droits d'Émissions .....	21
2.4.1 Introduction au concept du système d'échange .....	21
2.4.2 Mise en place du SPEDE .....	22
2.4.3 Impact potentiel sur les entreprises québécoises .....	23
2.5 Conclusion .....	24
CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	25
3.1 Introduction .....	25
3.2 Penser durable, une évolution nécessaire .....	26
3.3 Principales activités en logistique durable .....	29
3.3.1 Éco-conception des produits .....	29
3.3.2 Approvisionnement durable .....	30
3.3.3 Production durable .....	32
3.3.4 Transport durable .....	34
3.3.5 La logistique inverse .....	35
3.4 Chaîne d'approvisionnement et gaz à effet de serre .....	38
3.5 Approches envisagées .....	40
3.6 Conclusion .....	41
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE D'OPTIMISATION .....	43

4.1	Introduction.....	43
4.2	Structure de la chaîne d’approvisionnement étudiée .....	44
4.3	Formulation du modèle mathématique .....	47
4.3.1	Ensembles et indices .....	47
4.3.2	Variables de décisions considérées .....	47
4.3.3	Paramètres logistiques .....	48
4.3.4	Paramètres liés aux GES .....	50
4.3.5	Synthèse des coûts logistiques .....	52
4.3.6	Compensation .....	54
4.3.7	Synthèse des émissions de CO <sub>2</sub> .....	54
4.3.8	Fonction objectif .....	56
4.3.9	Définition des contraintes .....	56
4.4	Conclusion .....	59
CHAPITRE 5 STRUCTURE DES DONNÉES .....		61
5.1	Introduction.....	61
5.2	Données propres à la chaîne logistique.....	62
5.2.1	Approvisionnement.....	62
5.2.2	Production .....	64
5.2.3	Stockage.....	65
5.2.4	Transports .....	66
5.2.5	Nature de la demande.....	67
5.3	Données relatives à la compensation aux services de collecte .....	68
5.3.1	Poids et volumes des produits finis.....	68
5.3.2	Tarifs applicables .....	68
5.4	Données relatives aux émissions de gaz à effet de serre (GES) .....	69
5.4.1	Choix des facteurs d’émissions.....	69
5.4.2	Tarifs applicables .....	71
5.4.3	Allocation des droits d’émission.....	71
5.5	Conclusion .....	72
CHAPITRE 6 EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS .....		75
6.1	Introduction.....	75
6.2	Scénario de base : avant les réglementations environnementales.....	75
6.3	Scénario 1 : Entreprise assujettie à la compensation .....	77
6.4	Scénario 2: Gain potentiel sur la compensation.....	81
6.5	Scénario 3 : Entreprise assujettie à la compensation et au SPEDE .....	89
6.6	Scénario 4: Gain potentiel combiné.....	93
6.7	Scénario 5 : Cas d’un renforcement futur des législations .....	99
6.8	Conclusion .....	104
CONCLUSION.....		107
ANNEXE I TARIFICATION POUR LA COMPENSATION EN 2014 .....		111

ANNEXE II ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE LA HAUSSE DU PRIX MOYEN D'ACHAT DES COMPOSANTS AYANT BÉNÉFICIÉ DE L'ÉCOCONCEPTION .....	113
ANNEXE III RENFORCEMENT DES LÉGISLATIONS : VALEURS DES PARAMÈTRES ( $\theta$ , $z$ ) .....	115
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	117
SITES WEB CONSULTÉS.....	129





## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 5.1.	Non-compétitivité entre les fournisseurs de matières premières .....63
Tableau 5.2.	Coût d'achat unitaire (en \$) des composants standards versus verts .....64
Tableau 5.3.	Paramètres relatifs aux ouvriers travaillant aux usines manufacturières ...65
Tableau 5.4.	Capacités d'accueil et coûts de possession des infrastructures logistiques .....66
Tableau 5.5.	Caractéristiques principales des véhicules de livraisons .....66
Tableau 5.6.	Poids et volumes du produit standard versus produit vert .....68
Tableau 5.7.	Tarifs pour un kg de matière première collecté par les services de collectes.....69
Tableau 5.8.	Facteurs d'émissions des véhicules de livraison.....70
Tableau 5.9.	Facteurs d'émissions des bâtiments de type « usines manufacturières »...70
Tableau 5.10.	Facteurs d'émissions des bâtiments de type « entrepôts de stockage ».....71
Tableau 6.1.	Récapitulatif des coûts et pourcentages associés de la chaîne logistique non soumise aux lois environnementales.....76
Tableau 6.2.	Récapitulatif des coûts et pourcentages associés de la chaîne logistique assujettie à la loi sur la compensation aux services de collecte .....78
Tableau 6.3.	Justificatif de la facture associée à la compensation aux services de collecte .....79
Tableau 6.4.	Nombre d'ouvriers formés sur la nouvelle technologie à chaque période.....82
Tableau 6.5.	Quantités de matières premières impliquées dans le scénario vert.....83
Tableau 6.6.	Scénario standard versus vert : poids transportés .....84
Tableau 6.7.	Scénario standard versus vert : volumes transportés .....84
Tableau 6.8.	Scénario standard versus vert : véhicules utilisés pour les livraisons.....84

## XVIII

Tableau 6.9.	Hausse de 20% du prix d'acquisition des composants verts : bilan des matières premières impliquées dans la compensation .....87
Tableau 6.10.	Scénario +20% : poids transportés en kilogrammes .....89
Tableau 6.11.	Scénario +20% : Volumes transportés en m <sup>3</sup> .....89
Tableau 6.12.	Scénario +20% : Nombre de véhicules requis pour les livraisons.....89
Tableau 6.13.	Bilan carbone annuel de l'entreprise assujettie aux limitations d'émissions .....90
Tableau 6.14.	Quantités d'émissions impliquées dans le scénario vert.....94
Tableau 6.15.	Scénarios verts versus scénarios standards : récapitulatif de l'information .....98
Tableau 6.16.	Compromis entre production verte versus production standard en fonction de la hausse du prix d'acquisition des composants verts : Synthèse .....98
Tableau 6.17.	Impact d'un renforcement des législations sur le plan tactique optimal de production dans les prochaines années .....102

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1.	Facteurs d'incitation à des pratiques de logistique durables.....15
Figure 2.2.	Structure organisationnelle de la loi sur la compensation .....17
Figure 2.3.	Chaîne d'approvisionnement assujettie à la compensation .....19
Figure 2.4.	Schéma du système traditionnel d'échange des droits d'émissions.....21
Figure 3.1.	Les trois piliers de la chaîne d'approvisionnement durable.....26
Figure 3.2.	La complexité ajoutée par la logistique inverse.....36
Figure 4.1.	Principe de fonctionnement de la loi québécoise sur la compensation.....44
Figure 5.1.	Composants standards versus composants éco-conçus.....63
Figure 5.2.	BOM standard versus BOM vert .....64
Figure 5.3.	Estimation de la demande annuelle pour la famille de produit étudiée .....67
Figure 6.1.	Répartition des coûts de la chaîne d'approvisionnement non soumise aux réglementations environnementales .....76
Figure 6.2.	Répartition des coûts de la chaîne d'approvisionnement soumise à la loi sur la compensation aux services de collecte.....78
Figure 6.3.	Synthèse des quantités de matières premières mises sur le marché.....80
Figure 6.4.	Structure de coûts de la chaîne d'approvisionnement: scénario standard versus vert .....81
Figure 6.5.	Synthèse des quantités de matières premières impliquées dans le scénario vert.....83
Figure 6.6.	Taux de production des produits verts VS standards en fonction de la hausse du prix d'achat des composants éco conçus.....86
Figure 6.7.	Structure de coûts de la chaîne logistique pour une hausse de 20% des coûts d'acquisition des composants verts.....87

Figure 6.8.	Quantités de matières premières mises sur le marché en kg : scénario hausse de 20% du prix d'acquisition .....	88
Figure 6.9.	Structure de coûts de la chaîne logistique soumise aux deux lois environnementales : scénario 100% de production standard.....	91
Figure 6.10.	Répartition des émissions de GES par secteurs d'activités .....	92
Figure 6.11.	Entreprise assujettie aux deux lois environnementales : scénario vert .....	93
Figure 6.12.	Taux de production vert VS standard en fonction de la hausse du prix d'achat des composants éco conçus : entreprise assujettie aux deux réglementations .....	95
Figure 6.13.	Impact du taux de production verte sur le bilan carbone de l'entreprise ...	96
Figure 6.14.	Impact du taux de production verte sur le poids transporté et la compensation .....	97
Figure 6.15.	Entreprise assujettie aux deux lois environnementales : $\Omega = 33.5\%$ .....	99
Figure 6.16.	Structure de coûts de la chaîne d'approvisionnement pour $\Omega = 33.5\%$ ..	100

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

ABOM	Average Bill of Materials
ACV	Analyse du Cycle de Vie
AHP	Analytic Hierarchy Process
BOM	Bill of Materials
BOM 1	Standard Bill of Materials
BOM 2	Green Bill of Materials
CEI	Contenants, Emballages et Imprimés
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
EC*	Éco conçus
ÉEQ	Éco Entreprise Québec
ELV	End of Life Vehicle
FMCG	Fast Moving Consumer Goods
FSC	Forward Supply Chain
FTL	Full Truck Load
GES	Gaz à Effet de Serre
JIT	Just in Time
KtCO <sub>2</sub>	Émission de mille tonnes métriques d'équivalent carbone
LCA	Life Cycle Assessment
LQE	Loi sur la Qualité et l'Environnement
LTL	Less Than Truckload
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MDDEP	Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs
MILP	Mixed Integer Linear Program
MIP	Mixed Integer Program
MOLP	Multi-Objective Linear Program
ONG	Organisations Non Gouvernementales
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PTAC	Poids Total Autorisé en Charge
REP	Responsabilité Élargie des Producteurs

RoHS	Restriction of Hazardous Substance
SCM	Supply Chain Management
SMDD	Sommet Mondial sur le Développement Durable
SPEDE	Système de Plafonnement et d'Échange des Droits d'Émissions
SSCM	Sustainable Supply Chain Management
URSS	Union des Républiques Souveraines Soviétiques
US	United States
WCI	Western Climate Initiative
WEEE	Waste on Electrical and Electronic Equipment

## INTRODUCTION

Depuis plus de deux décennies aujourd'hui, industriels et académiques de tous horizons s'intéressent à la problématique environnementale posée par la dynamique industrielle des grandes chaînes logistiques actuelles. Trop longtemps ignorée, cette composante majeure de la chaîne d'approvisionnement se trouve être l'un des plus importants défis du siècle à venir en terme de logistique nationale comme internationale. La recherche au sujet des chaînes d'approvisionnement durables évolue continuellement et les principales mesures concrètes permettant de rendre les pratiques logistiques plus respectueuses de l'environnement sont étudiées à plusieurs reprises par de nombreux auteurs dans la littérature. Il peut s'agir d'amélioration dans le secteur des transports comme de meilleures tournées de véhicules ou bien des modifications de carburant. Il peut s'agir d'analyse du cycle de vie des produits mis sur le marché, d'éco-conception ou éco-design, ou encore de collecte des produits en fin de cycle de vie, de réutilisation, remise à neuf ou encore recyclage des matières premières pour ne citer que quelques exemples. Aussi l'accent se porte parfois sur un enjeu primordial lorsqu'on parle de réchauffement climatique : les émissions de gaz à effet de serre. Si de plus en plus d'entreprises tendent à mettre en place de telles pratiques, c'est qu'elles rencontrent des pressions de la part de plusieurs acteurs majeurs de la chaîne d'approvisionnement.

Premièrement, la tendance actuelle à propos du mode de consommation est en train d'évoluer et de plus en plus de consommateurs sont soucieux des produits qu'ils consomment : origine, composition, impact sur l'environnement *etc.* Ainsi, être en mesure de proposer un panel de produits dits verts est devenu ces derniers temps un avantage concurrentiel non négligeable pour les entreprises et ce, dans une très grande diversité de secteurs industriels. De plus, étant donné l'intérêt croissant pour ce type de biens et services, les pressions exercées par les actionnaires de la chaîne logistique sont fréquentes et bien souvent les managers sont contraints d'évoluer vers ce genre d'attitude écoresponsable. Aussi, il existe un dernier paramètre et non le moindre, qui influence de plus en plus les pratiques et les politiques corporatives : les lois gouvernementales. En effet, de plus en plus on voit l'apparition de nouvelles mesures à l'initiative des gouvernements qui visent à sanctionner financièrement

de mauvaises pratiques environnementales des entreprises. De nouvelles lois émergent, tandis que d'autres déjà en place se durcissent au fil des années et laissent de moins en moins de libertés aux anciennes politiques corporatives uniquement basées sur le profit et trop peu soucieuses de l'environnement. Les entreprises se retrouvent en fait face à un choix avec deux issues possibles :

- 1- Conserver leur mode de fonctionnement actuel et subir les conséquences de l'évolution des réglementations environnementales
- 2- Mettre en œuvre les mesures nécessaires pour contrôler et minimiser leur impact environnemental

Bien souvent le premier choix implique une pénalité financière pouvant varier de très faible à considérable. Aujourd'hui encore, beaucoup d'entreprises sont réticentes à l'idée de mettre en œuvre les mesures nécessaires pour contrôler leur impact environnemental, car ces dernières sont coûteuses en temps, en ressources (personnel, connaissances, consultation externes *etc.*) et bien évidemment en investissement. Ainsi, pour certaines compagnies, il est bien plus rentable économiquement de compenser au moyen d'une légère sanction financière plutôt que d'évoluer vers de nouvelles politiques et pratiques corporatives.

Cependant, de plus en plus d'entreprises évoluent et rivalisent d'ingéniosité pour trouver le meilleur moyen de s'adapter aux changements et aux exigences actuelles en termes d'environnement. Certaines dans le but de suivre une loi en vigueur et d'éviter une éventuelle pénalité financière, d'autres avec des objectifs liés au marketing et pour attirer de nouveaux clients, ou encore en réponse à des consommateurs déjà fidélisés et dont les besoins et les attentes évoluent également, les raisons sont multiples. En réalité, si les raisons sont multiples, c'est encore plus le cas des mesures prises par les entreprises dans leur processus d'adaptation. Chaque secteur industriel présente ses propres faiblesses et chaque type d'activité manufacturière implique un impact différent sur l'environnement, par exemple lorsque certaines compagnies vont tenter de réduire leur consommation énergétique lors de la



production, d'autres vont être plus concernées par la valeur ajoutée qu'ils pourraient donner à leurs produits en mettant en place un processus de recyclage et/ou de remise à neuf à la fin du cycle de vie. De plus, au sein d'un même secteur industriel, les stratégies et politiques corporatives diffèrent, ce qui rend de ce fait encore plus grande la variété de possibilités d'améliorations existantes. Néanmoins, parmi l'ensemble des lois gouvernementales en place, ce travail de recherche met l'accent sur deux éléments faisant actuellement partie intégrante du quotidien de plusieurs milliers d'entreprises au Québec : les limitations d'émissions de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le principe de compensation. Malgré la portée mondiale du protocole de Kyoto depuis 1997, c'est seulement depuis 2013 que le gouvernement du Québec possède son propre système de régulation des émissions de carbone en partenariat avec la Californie : le SPEDE (Système de Plafonnement et d'Échange des Droits d'Émissions). Quant au principe de compensation, il s'agit d'une loi visant à faire contribuer les entreprises aux coûts annuels engendrés par les services municipaux de collecte et de recyclage. En effet les compagnies qui mettent sur le marché des produits finis destinés aux consommateurs sont désormais responsables depuis 2005 du processus de récupération et de revalorisation en fin de cycle de vie. Si le SPEDE présente un plan d'action connu jusqu'en 2020, les tarifs applicables aux compensations dues par les entreprises sont également publics et en constante évolution depuis 2005. À travers ce travail, nous allons tenter de mettre en évidence l'impact éventuel de ces deux réglementations mises en place par le gouvernement du Québec sur les entreprises locales.

Pour ce faire, nous allons considérer différentes activités de la chaîne logistique en portant un intérêt particulier sur l'approvisionnement en matières premières et la production aux usines manufacturières. Il est important de noter que les décisions relatives à ces deux activités sont bien évidemment étroitement liées et appartiennent toutes deux au management logistique à un niveau de décision tactique. Comme indiqué plus haut, notre raisonnement suivra trois (3) étapes bien définies. Premièrement, nous allons nous placer dans la situation d'une entreprise en activité avant la mise en place de ces deux réglementations et ainsi établir le plan optimal d'approvisionnement/production qui minimisera les coûts logistiques sur un horizon de planification annuel divisé en quatre trimestres. Par la suite, nous tenterons de

mettre en évidence les conséquences immédiates de l'application de ces deux lois sur les décisions optimales applicables lors de la première phase. Enfin, nous allons supposer, comme le laisse entendre la tendance de ces dernières années, que dans un futur proche ces récentes mesures gouvernementales sont amenées à se durcir progressivement. Ainsi nous étudierons les conséquences d'un renforcement des deux lois mentionnées ci-dessus sur l'organisation de l'entreprise.

## CHAPITRE 1

### PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

#### 1.1 Définition de la problématique

Le présent mémoire de recherche porte sur l'impact potentiel de la loi sur la compensation aux services de collecte ainsi que sur celui de l'allocation d'une limite de droit d'émissions de GES sur les entreprises dans la province de Québec. À partir des données environnementales réelles des législations en vigueur aujourd'hui, nous allons tenter de comprendre si de telles mesures peuvent s'avérer effectivement contraignantes pour certaines compagnies locales. Ces réglementations sont initialement mises en place par le gouvernement dans le but de contraindre les entreprises québécoises à adopter une meilleure attitude environnementale lors de la pratique de leurs activités quotidiennes afin de s'inscrire dans un processus de durabilité industrielle. Ainsi, le moyen de pression utilisé résulte bien souvent en des sanctions économiques infligées aux entreprises qui n'atteignent pas les objectifs fixés par les institutions responsables.

Cependant, adapter une activité industrielle à une nouvelle réglementation environnementale n'est pas une mince affaire. En effet, le changement des pratiques au quotidien demande un effort d'adaptation considérable : Investissement initial souvent très élevé (nouvelles technologies, expansion de la capacité de certaines infrastructures *etc.*), les connaissances techniques requises (comment fonctionne cette nouvelle technologie et comment en tirer profit au maximum ? qu'est-ce qu'une empreinte carbone ?), beaucoup de temps (mise en place du matériel et réorganisation du plancher de production et d'entreposage, formations du personnel *etc.*). Bien souvent les entreprises ne possèdent pas les connaissances à l'interne, elles n'ont que peu de temps à investir pour effectuer une telle transition et surtout elles n'en ont pas forcément les moyens financiers. C'est ainsi que face à des réglementations trop peu sévères et dont les sanctions économiques se révèlent peu contraignantes, nombreuses sont celles qui trouvent bien plus avantageux de ne pas passer à l'acte et de s'acquitter de cette pénalité financière qu'elles nommeront bien souvent d'ailleurs « la taxe environnementale »

du fait de leur sentiment d'impuissance face au changement requis par le gouvernement à travers ces législations. C'est là le questionnement de ce travail de recherche : Dans quelle mesure la loi sur la compensation aux services de collecte et la limitation des émissions de GES par le SPEDE en vigueur au Québec peuvent-elles représenter une contrainte pour les entreprises locales aujourd'hui ? Et dans le cas contraire, en serait-il de même si ces deux réglementations venaient à se durcir dans les années suivantes ?

Notre avis est qu'en l'état actuel des choses, ces deux lois environnementales peuvent s'avérer contraignantes pour certaines entreprises particulièrement touchées, mais une bonne partie d'entre elles peut encore se permettre de payer la facture environnementale annuelle sans avoir à remettre en question ses pratiques quotidiennes. De son côté, la loi sur la compensation est encore en évolution du fait que chaque année elle vise de plus en plus de CEI et voit ses tarifs augmenter progressivement chaque année. De plus, le SPEDE québécois n'est en place que depuis 2012 et sa première période de conformité a débuté seulement en 2013, ce qui est encore très récent et clairement en phase de test. Tout comme pour la loi sur la compensation, de nouveaux secteurs industriels vont être assujettis au SPEDE à partir de la deuxième période de conformité qui débute en 2015, ce qui devrait donner de l'élan et du poids à cette loi naissante. Ainsi étant donné l'évolution prévue, nous pensons qu'il est probable que d'ici quelques années les entreprises assujetties se retrouvent face à un vrai challenge concernant l'attitude à adopter vis à vis de ces deux lois environnementales. C'est pourquoi nous proposons à travers ce travail une approche méthodologique suggérant une alternative pour certaines entreprises intéressées leur permettant de réduire la facture environnementale associée à la compensation et au SPEDE.

## **1.2 Démarche de résolution proposée**

Pour ce faire, nous proposons l'étude d'une chaîne d'approvisionnement à trois (3) échelons (fournisseurs de matières premières, usines de production, centres de distribution et magasins de détails). Nous partons de l'hypothèse que cette chaîne d'approvisionnement modélise une entreprise assujettie à ces deux lois environnementales, c'est à dire qu'elle met sur le marché

à la disposition du consommateur des CEI visés par la loi, et que son activité industrielle engendre des émissions de GES supérieures à 25KtCO<sub>2</sub> équivalents par année (pour les conditions précises d'assujettissement, voir sections 1.3.3 et 1.4.2 de ce même chapitre). Nous supposons que l'entreprise étudiée œuvre dans un secteur particulièrement touché par ce type de réforme, comme par exemple le secteur des biens de consommation rapides (*Fast Moving Consumer Goods* : FMCG) tel le secteur de l'agroalimentaire. Initialement, l'entreprise met sur le marché une gamme de produits (ou famille de produits) dont les CEI sont fabriqués à partir d'un ensemble de matériaux (aussi appelés composants dans la suite de notre travail) selon une nomenclature particulière appelée *Bill Of Material* (BOM). Ce BOM est assemblé aux usines par les ouvriers sur une technologie de production standard et le produit fini est ensuite envoyé aux centres de distribution pour y être stocké puis ensuite distribué aux différents magasins de détails à travers le Québec. Étant donné l'assujettissement de la compagnie aux deux lois environnementales mentionnées plus haut, notre travail propose de s'intéresser à l'introduction d'une gamme de produits dits « verts » au sein de la chaîne d'approvisionnement. Il s'agit en fait de la même famille de produit que celle proposée aux consommateurs actuellement, mais assemblée à partir de certains composants ayant fait l'objet d'un travail d'éco-conception préalable. Ceci permet à la fois d'atteindre un poids final allégé présentant un avantage pour la compensation et également de diminuer l'impact carbone initial à l'achat des matières premières, ces dernières ayant bénéficié de procédés d'extraction plus propres. Par la suite, nous émettons l'hypothèse selon laquelle ces composants sont assemblés au moyen d'une nouvelle technologie, que l'on appellera aussi technologie propre dû à son faible niveau d'émissions de GES, et dont l'utilisation requiert une formation particulière de nos ouvriers. Aussi, nous supposons ici qu'il s'agit de la même famille de produit et que la demande du consommateur ne tient pas compte de la version du produit fini : standard ou vert. Ce dernier souhaitant se procurer un produit fini sera donc aussi bien satisfait par un produit standard ou bien par un la nouvelle gamme de produit, l'intérêt étant de laisser l'entreprise libre dans ses décisions d'approvisionnement et de production. Le but de cette étude est le suivant : l'entreprise possède déjà sa propre façon de faire, et elle applique son plan optimal d'approvisionnement et de production afin de mettre sur le marché la version standard du produit fini. Cependant,

elle fait face à des lois environnementales qui pourraient s'avérer problématiques dans un futur proche et s'interroge sur la possibilité d'introduire cette nouvelle version du produit (i.e. produit vert) sur le marché. Ainsi, nous nous proposons d'étudier :

- 1- Dans quelles mesures ces deux réglementations affectent aujourd'hui l'entreprise assujettie ?
- 2- Dans quelles mesures l'introduction de la nouvelle gamme de produits verts sur le marché agirait-elle sur la facture environnementale de l'entreprise ?
- 3- À quel point la situation risque de devenir problématique dans les prochaines années dans le cas où ces lois venaient à se durcir ?

Pour ce faire, nous allons remettre en question le plan optimal d'approvisionnement et de production de la chaîne d'approvisionnement concernée. Nous mettrons en évidence que l'introduction d'une gamme de produits verts présente un réel intérêt dépendamment du prix d'acquisition des composants éco-conçus, ainsi que dans le cas d'un renforcement futur des législations. Ainsi, l'outil d'aide à la décision proposé dans le Chapitre IV pourrait permettre d'aider certaines compagnies locales à revoir leurs pratiques et diminuer leurs factures environnementales de manière significative pour les plus touchées.

## **CHAPITRE 2**

### **MISE EN CONTEXTE DU PROBLEME ÉTUDIÉ**

#### **2.1 Introduction sur la prise de conscience environnementale de l'industrie**

En juin 1972 débutait la conférence mondiale des Nations Unies sur l'environnement dans la capitale suédoise de Stockholm. Le but principal de cet événement était de mettre en place une coordination des états participants afin de faire face aux dangers causés par une pollution croissante. Cette rencontre internationale autour de l'environnement appelée "premier sommet de la terre" est à l'origine du programme des Nations Unies pour l'environnement et conduira pour la première fois au concept d'écodéveloppement.

La volonté de continuité amènera un second sommet de la terre qui sera tenu au Kenya à Nairobi en 1982. Cependant les mauvaises conditions politiques et la tension internationale durant la guerre froide feront de cette initiative un échec, étant donné le désintérêt de deux acteurs majeurs : États-Unis et URSS. De plus à l'époque, les lobbies industriels voyaient le concept d'écodéveloppement comme un frein à leurs activités et dans leur état d'esprit il s'agissait d'un luxe qu'ils ne pouvaient pas se permettre.

Néanmoins, l'initiative de Stockholm en 1972 va tout de même porter ses fruits lors du troisième sommet de la terre qui se tiendra en juin 1992 à Rio de Janeiro. En effet, durant une période de dix (10) jours se sont rencontrés et ont débattus 182 états et plus d'un millier (1000) d'organisations non gouvernementales (ONG). Cette rencontre sans précédent dans l'histoire contribuera très largement à la prise de conscience collective et à la naissance du concept de "développement durable" regroupant ainsi explicitement les problématiques économiques, environnementales et sociales. D'ailleurs c'est lors de cette rencontre que va émerger ce qui est aujourd'hui connu comme la définition classique du développement durable : « Un développement qui permet de répondre aux besoins de la génération présente sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Si quelques mesures environnementales avaient déjà été engagées (convention de Washington au sujet

des espèces en voie de disparition, convention de Bâle à propos des déchets toxiques, protocole de Montréal sur la couche d'ozone, *etc.*) ce troisième sommet de la terre va permettre de passer à un tout autre niveau avec la déclaration de Rio qui composée 27 principes fondamentaux. De plus un programme nommé Agenda 21 sera adopté, ce dernier contient pas moins de 2500 mesures à appliquer à différentes échelles : mondiale, nationale, ainsi que locale. Par la suite, un quatrième sommet mondial aura lieu entre août et septembre 2002 à Johannesburg en Afrique du Sud. Cette fois-ci, l'appellation est claire : Sommet Mondial sur le Développement Durable (SMDD), dont le principal objectif est de faire le suivi suite au sommet de Rio et d'établir un bilan. Entre chefs d'états et délégués, cette conférence internationale regroupera plusieurs dizaines de milliers de personnes et deviendra ainsi la plus importante rencontre jamais organisée par les Nations Unies. De nombreux sujets considérés comme ayant une grande importance seront abordés tels que les ressources naturelles, la mondialisation, les droits de l'homme et la pauvreté dans le monde. On y retrouvera certains thèmes principaux tels que l'utilisation de l'eau et de l'énergie, la santé et la biodiversité comme éléments clés du développement durable.

C'est ainsi, à l'image de ces quatre (4) sommets internationaux (Stockholm 1972, Nairobi 1982, Rio 1992, Johannesburg 2002), que la fin du 20<sup>ème</sup> siècle voit naître une prise de conscience générale au sujet d'un besoin de changement des politiques et pratiques industrielles dans un but de développement de toute une génération de manière responsable. Dès lors, les entreprises vont commencer à se poser des questions au sujet des moyens à mettre en place pour parvenir à réorienter leurs activités de telle manière à coïncider avec ce concept émergent de durabilité. Encore aujourd'hui en 2015 et dans des secteurs industriels très variés, de nombreuses entreprises font face à ce défi et ne sont pas encore parvenues à évoluer de manière significative. Cette situation est devenue problématique pour certaines d'entre elles étant donné le nombre croissant de pressions subies à cet égard : consommateurs plus exigeants, pressions exercées par les actionnaires, pression des groupes environnementaux, réputation de l'entreprise, ou encore les nombreuses législations gouvernementales en place.



## **2.2 Les principales incitations au changement**

### **2.2.1 Satisfaction d'une classe émergente de consommateurs**

Effectivement, avec l'apparition du concept de développement durable vient l'apparition d'une nouvelle catégorie de consommateurs. Il s'agit d'une attitude plutôt logique de la part de ces derniers, étant donné la prise de conscience des gouvernements au sujet d'une problématique environnementale planétaire. Le citoyen classique, et donc le premier consommateur, commence à s'interroger sur son propre avenir, sur l'avenir de ses enfants et petits-enfants ainsi que sur l'avenir de la planète si l'on ne change pas le cours des choses. C'est ainsi que bon nombre d'entre eux prennent en considération le caractère écoresponsable des produits qu'ils achètent ou consomment et ce, de manière consciente ou inconsciente. Beaucoup de consommateurs sont aujourd'hui à la recherche d'un écolabel ou encore, ils analysent attentivement chaque étiquette lors de leurs achats à la recherche d'informations relatives à l'environnement. C'est pourquoi certaines entreprises font aujourd'hui face à une situation délicate car pour celles qui ne sont pas en mesure de valoriser les bienfaits de leurs produits au niveau environnemental, le risque de perdre une partie de la clientèle au profit d'un concurrent plus "vert" est de plus en plus fréquent.

Le géant du commerce en ligne Amazon est parmi ceux qui ont su tirer profit de cette nouvelle exigence chez ses clients. Suite à une série de commentaires négatifs sur leur site internet au sujet des emballages au courant de l'année 2007, Amazon décide de lancer sur la toile en 2008 un questionnaire destiné à l'ensemble de ses consommateurs afin de connaître leurs exigences en la matière afin de mieux comprendre l'insatisfaction que certains d'entre eux avaient manifesté. Après avoir analysé l'ensemble des réponses, la synthèse du questionnaire a servi au département de recherche et développement à concevoir une toute nouvelle gamme d'emballages pour l'année 2009. Suite aux retours positifs engendrés, le leader mondial de l'e-commerce a su répondre à un nouveau panel de consommateurs et est ainsi parvenu à augmenter le nombre d'abonnés.

### **2.2.2      Avantage compétitif**

En effet cela nous conduit directement au problème de la compétitivité au sein de l'industrie actuelle. De nos jours, il n'est pas rare de constater qu'une entreprise perd du terrain et peut se voir perdre des clients et/ou parts de marchés au profit de concurrents qui sont reconnus pour leurs valeurs environnementales. C'est pourquoi certaines d'entre elles utilisent des arguments directement liés au développement durable afin de fidéliser une clientèle déjà en place.

La multinationale PUMA a su tirer un avantage compétitif à travers le thème du développement durable. En effet, depuis quelques années maintenant, le géant du textile à choisit d'appliquer ce qu'il appelle une politique de "transparence totale" quant à l'impact de leurs activités sur l'environnement. Ainsi, sur leur site Web, une grande quantité d'informations et de rapports sont disponibles au sujet des émissions de gaz à effet de serre engendrées par l'entreprise ainsi que sur la consommation en eau. Les chiffres présentent les objectifs à atteindre et mettent en évidence le succès de la compagnie en termes de développement durable.

### **2.2.3      Réputation de l'entreprise**

En revanche si une compagnie peut aller chercher un avantage compétitif grâce à une attitude écoresponsable, cela est également le cas dans le sens inverse et une mauvaise réputation peut vite affecter de manière significative l'image de la marque.

La compagnie British Petroleum, acteur majeur dans le secteur pétrolier, a en effet souffert pendant un certain temps de sa mauvaise réputation en termes d'impact environnemental. En effet, la compagnie s'est vue accusée à plusieurs reprises de pratiques douteuses quant à la pollution de l'eau et de l'air par ses activités. De plus, l'explosion de la plateforme pétrolière dans le golfe du Mexique en 2010 causant une marée noire sans précédent aura coûté cher à l'entreprise. Non seulement un montant de près d'un milliard de dollars de dommages et intérêts, mais aussi une perte de confiance certaine de la part de ses clients et partenaires.

#### **2.2.4 Pression des groupes environnementaux**

Avec l'apparition du concept de développement durable se sont développés des organismes à buts non lucratifs dits « de défense de l'environnement ». Bien mieux structurés et organisés que de simples groupes de citoyens, ces derniers contribuent à la prise de conscience généralisée d'une cause qui selon eux dépasse de loin les considérations économiques. Bien que n'étant aucunement de nature légale, ces groupes de pressions environnementaux ont une influence certaine sur le comportement de beaucoup d'entreprises car leur pouvoir de diffusion est très important et peut ainsi contribuer à déstabiliser l'image d'une marque assez rapidement.

Bien que ne disposant aucunement d'un pouvoir législatif, l'influence de ces groupes environnementaux n'est pas à prendre à la légère et ce, même lorsqu'il s'agit de très grandes marques. En effet, le leader mondial de l'électronique Apple en a lui-même fait les frais, en 2006 et 2007, apparaissant dernière au classement dans le secteur électronique à deux reprises à l'initiative de l'organisme Greenpeace sur une quinzaine d'entreprises évaluées à partir de critères environnementaux. Parmi ces critères, on retrouve l'utilisation de composants polluants, la gestion des déchets, ainsi que le recyclage. Cette mauvaise publicité a conduit très rapidement la compagnie à repenser sa stratégie concernant la sortie de l'iPhone 3 afin de ne pas se mettre à dos de nombreux adeptes de la marque.

#### **2.2.5 Réponse aux pressions des actionnaires**

Comme on a pu le voir précédemment, ne pas tenir compte de la tendance actuelle clairement en faveur du développement durable peut rapidement devenir néfaste pour une entreprise. Ainsi de manière évidente, les actionnaires principaux n'hésite pas à imposer des objectifs clairs dans cette direction et les managers se voient contraints de trouver des solutions qui répondent à cette exigence de développement et de croissance responsable.

Le géant de l'électronique SAMSUNG a dû faire face à ce genre de situation. Au début des années 2000, les critiques étaient de plus en plus nombreuses au sujet de l'approvisionnement en coltan (une matière première requise pour les produits téléphoniques). Toutefois, ces dernières ne portaient pas directement sur la matière première en elle-même, mais plutôt sur les conditions d'extraction dans certains pays, accusés d'avoir recours à des pratiques très peu respectueuses de l'environnement ainsi que du personnel ouvrier. Ainsi, cette mauvaise publicité a conduit les actionnaires à réagir et à imposer un changement radical dans la politique d'approvisionnement. Depuis, l'achat de la totalité du coltan a été relocalisé dans d'autres pays avec des pratiques en faveur d'un développement durable.

#### **2.2.6 Respect du cadre légal**

Le dernier aspect abordé, et non le moindre, réfère aux législations en place. En effet, jusqu'à maintenant, les raisons évoquées en faveur d'une adaptation des activités de l'entreprise n'ont pas un caractère légal, ni obligatoire. Si une compagnie juge nécessaire de changer d'attitude afin d'aller chercher une clientèle supplémentaire, c'est son choix. Si elle souhaite réorienter ses activités pour bénéficier d'une bonne réputation auprès du public, c'est son choix. C'est pourquoi partout dans le monde les gouvernements mettent en place des lois environnementales afin de contraindre celles-ci à évoluer, sans quoi les compagnies s'exposent à de lourdes sanctions financières, des recours en justice, et même l'arrêt définitif de leurs activités si nécessaire.

Un exemple typique est celui d'un des leaders mondiaux de l'industrie des produits de nettoyage : Global Solvent. En effet cette compagnie a fait les frais de la loi sur la restriction des matières dangereuses effective depuis 2006 en Europe (Directive RoHS : *Restriction of Hazardous Substance*). Le marché européen représentant plus de 60 % de ses ventes, la composition chimique d'une grande partie de ses produits a dû être modifiée sans quoi les pays européens n'étaient plus autorisés à importer ses articles.

Nous avons abordés dans ce début de chapitre les principales motivations rencontrées par les entreprises encourageant l'évolution des pratiques vers une chaîne d'approvisionnement plus durable. Le schéma suivant (Figure 2.1) dont les proportions sont inspirées de Seuring et Müller (2008), en récapitule les principaux éléments :

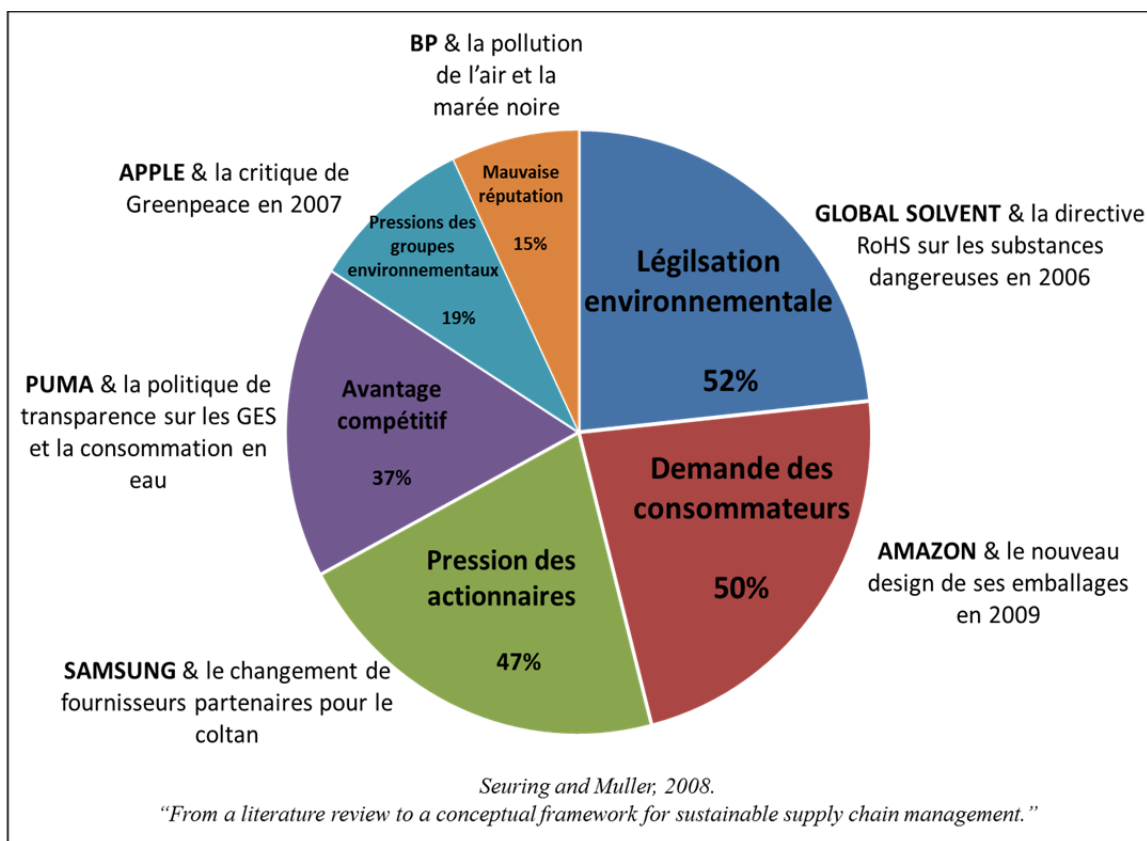


Figure 2.1. Facteurs d'incitation à des pratiques de logistique durables

Quelques-unes des principales réglementations en place aujourd'hui sont abordées dans la revue de la littérature, accompagnées de quelques travaux de recherches à leur sujet. Cependant, le présent travail s'intéresse à deux (2) d'entre elles en particulier :

- 1- La loi sur la compensation aux services de collectes municipaux.
- 2- La loi sur les émissions de gaz à effet de serre (SPEDE).

Ces deux lois environnementales aujourd'hui en vigueur et ciblant les entreprises québécoises sont expliquées plus en détail dans la suite de ce chapitre.

## **2.3 La loi sur la compensation aux services de collecte au Québec**

### **2.3.1 Mise en place de la législation**

La législation définissant les règles de la compensation aux services de collectes municipaux au Québec a été publiée en novembre 2004. Ce projet de loi fait partie d'une réglementation plus vaste appelée la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) établissant les règles et normes québécoises en matière d'environnement. On y trouve notamment le type d'entreprise assujettie à la compensation ainsi que la justification de la nécessité de celle-ci. On y trouve aussi des obligations relatives aux municipalités comme le devoir de produire une déclaration signée par un vérificateur externe au sujet des coûts nets des services de collecte. Depuis 2004, la loi a été mise à jour deux fois, en 2011 ainsi qu'en 2013. Parmi les quelques adaptations ayant eu lieu annuellement, on trouve les tarifs applicables à la compensation ainsi que les augmentations des proportions des coûts supportés par les entreprises, à savoir de 50 % à 70 % en 2010, 80 % en 2011, 90 % pour 2012 et la totalité à partir de 2013.

### **2.3.2 RECYC QUÉBEC et Éco-Entreprise Québec (ÉEQ)**

RECYC QUÉBEC est une société d'état dont l'objectif est de promouvoir une meilleure utilisation des ressources et une meilleure gestion des matières résiduelles au Québec. Parmi les activités encouragées on retrouve notamment les 3R : Réduire, Réutiliser, Recycler. RECYC QUÉBEC est mandatée par le gouvernement via le ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs (MDDEP) afin de s'assurer que les réglementations environnementales sont appliquées dans le cadre de la responsabilité élargie des producteurs (REP).

Éco-Entreprise Québec est un organisme à but non lucratif qui a été créé et mandaté par RECYC QUÉBEC dans le but de structurer et gérer la compensation des entreprises québécoises aux services de collecte municipaux. Agréée par le gouvernement depuis 2005, ÉEQ a pour mission principale d'établir les tarifs applicables à la compensation et d'en collecter les fonds. Agissant comme intermédiaire entre les municipalités et les entreprises, ÉEQ a constaté ces dernières années que de percevoir la compensation était un bon début mais cependant insuffisant. Pour aller plus loin, l'optimisation de l'ensemble de la chaîne de valeur s'avère nécessaire. La structure du principe de compensation est présentée ci-dessous par la figure 2.2 :

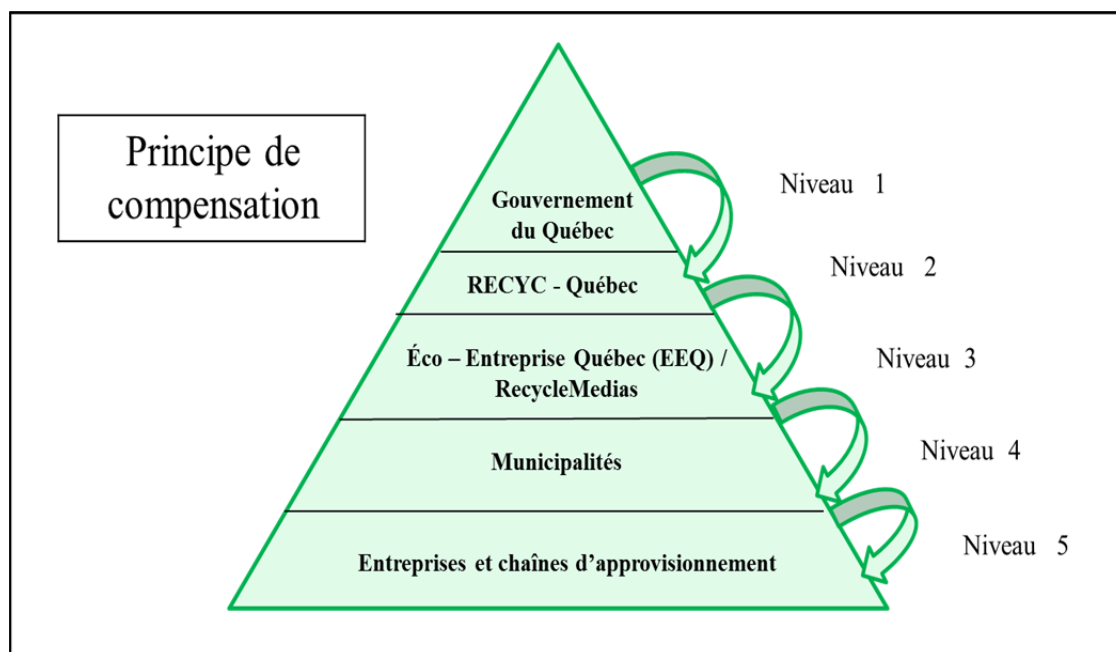


Figure 2.2. Structure organisationnelle de la loi sur la compensation

### 2.3.3 Fonctionnement du principe de compensation

Dans un premier temps, il s'agit de clarifier les conditions qui font qu'une entreprise est assujettie à la loi sur la compensation. Pour être ciblée, une entreprise doit réunir les trois (3) conditions suivantes :

- 1- Avoir un domicile, un établissement ou une place d'affaires au Québec.
- 2- Être propriétaire d'une marque, d'un nom ou d'un signe distinctif, ou en être le premier fournisseur au Québec.
- 3- Générer des contenants, des emballages et des imprimés (CEI) destinés ultimement aux consommateurs québécois.

Dans le cas en figure 2.3, si une entreprise est assujettie, alors elle devra chaque année verser un montant en compensation aux services de collectes municipaux. Le processus de compensation suit une séquence d'évènements bien définis :

- En début d'année  $n+1$  les entreprises concernées remplissent une déclaration indiquant les différents types et quantités (kg) de CEI mis sur le marché pour les consommateurs dans le courant de l'année  $n$ . Le bilan comptable des ventes annuelles sera exigé comme preuve attestant que la déclaration est correcte.
- Les municipalités remplissent de même une déclaration détaillant les coûts des services de collectes pour l'année considérée. Ce sont ces coûts qui feront l'objet d'une compensation à hauteur de 100 % de la part des entreprises depuis 2013.
- En fonction des déclarations mutuelles, ÉEQ estime les tarifs exigibles afin de récolter la totalité du montant dépensé par les municipalités durant l'année écoulée. Il s'agit de montants appliqués selon le poids et le type de matières premières impliquées dans la composition des CEI. (Voir un exemple de grille de tarification en Annexe I).
- Lorsque l'estimation des tarifs est terminée, ÉEQ rédige un rapport détaillé et l'envoie à RECYC QUÉBEC pour approbation des tarifs applicables.



- RECYC QUÉBEC pourra exiger une révision des tarifs ou bien approuver la proposition d'ÉEQ et ainsi faire suivre la proposition au gouvernement (MDDEP) pour officialisation et publication des tarifs dans la gazette officielle du Québec.

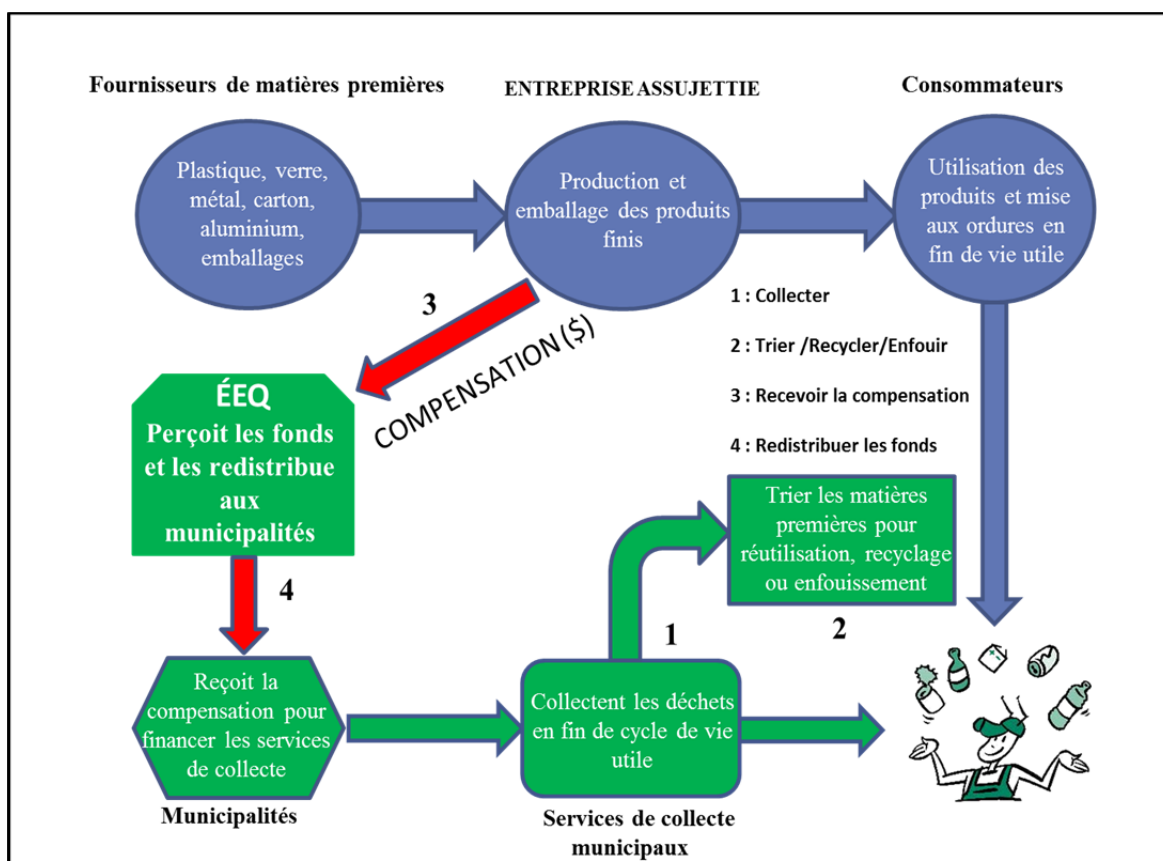


Figure 2.3. Chaîne d'approvisionnement assujettie à la compensation

Quelques exceptions sont à prendre en compte cependant :

- Les CEI qui sont utilisés pour simplifier les transports (conteneurs, pellicules plastiques, palettes en bois, *etc.*)
- Les CEI vendus eux-mêmes en tant que produits (sacs poubelles, boîte CD vides, *etc.*)

- Les CEI de protection des produits jusqu'à la fin de leur cycle de vie (étui d'appareil photos *etc.*)
- Les CEI pris en charges immédiatement lorsque le produit est utilisé ou consommé sur les lieux même (emballage de nourriture au restaurant, couverts en plastiques, pailles)
- Les livres (bouquins) ne sont pas non plus comptés dans la catégorie des imprimés.

Éco Entreprise Québec est très clair au sujet de ces exceptions. Elles sont visées par la loi mais pour le moment exclues de la déclaration. Cependant, il est explicitement précisé par ÉEQ que dans un avenir proche la législation va évoluer et toutes ces exceptions seront désormais sujettes à la déclaration au même titre que tous les autres CEI. Le but de la manœuvre étant d'inclure un nombre croissant d'entreprises dans la participation à la compensation afin d'être en mesure de mieux répartir les coûts.

#### **2.3.4 Impact sur les entreprises québécoises**

Les objectifs gouvernementaux sont précisément définis dans les textes officiels. Si la réglementation sur la compensation a été mise en place en 2004 c'est pour inciter les entreprises à agir sur leurs contenants, emballages et imprimés afin d'être en mesure de réduire de 700 kg par habitant le poids moyen de déchets pris en charge par les services de collecte chaque année. L'impact direct sur les entreprises québécoises ? Une facture supplémentaire en fin d'année. Si initialement certaines compagnies décidaient de faire l'impasse sur cette compensation, c'est-à-dire ne rien changer à leurs activités ni à leurs CEI et ainsi simplement payer la facture en fin d'année, l'évolution des pourcentages de prise en charge ainsi que l'augmentation annuelle des tarifs impliquent aujourd'hui une remise en question pour les plus touchées : Quelles seront les conséquences pour mon entreprise si la législation continue de se durcir encore pour les prochaines années ? En 2014, plus de 3250 entreprises sont assujetties à la compensation pour un excédant les 130 millions de dollars perçus par ÉEQ. Étant donné les nouveaux CEI prochainement considérés dans la déclaration, on peut s'attendre à une nette augmentation de ces deux chiffres.

## 2.4 Le Système québécois de Plafonnement et d'Échange des Droits d'Émissions

### 2.4.1 Introduction au concept du système d'échange

Le principe d'un système d'échange de droits d'émission est exposé ci-dessous en figure 2.4. Il s'agit d'allouer à chaque participant des permis d'émissions (aussi communément appelés quotas), pour une certaine période de temps. Les participants excédant leurs quotas d'émissions doivent acheter des quotas supplémentaires afin de couvrir leur dépassement auprès d'autres participants ayant à l'inverse des quotas en surplus ou bien au gouvernement. Le fonctionnement d'un tel système implique que le gouvernement fixe une limite d'émissions et accorde en conséquence des « droits de polluer » aux entreprises pour ensuite laisser le marché se mettre en place entre les différents acteurs (Fragnière, 2009).

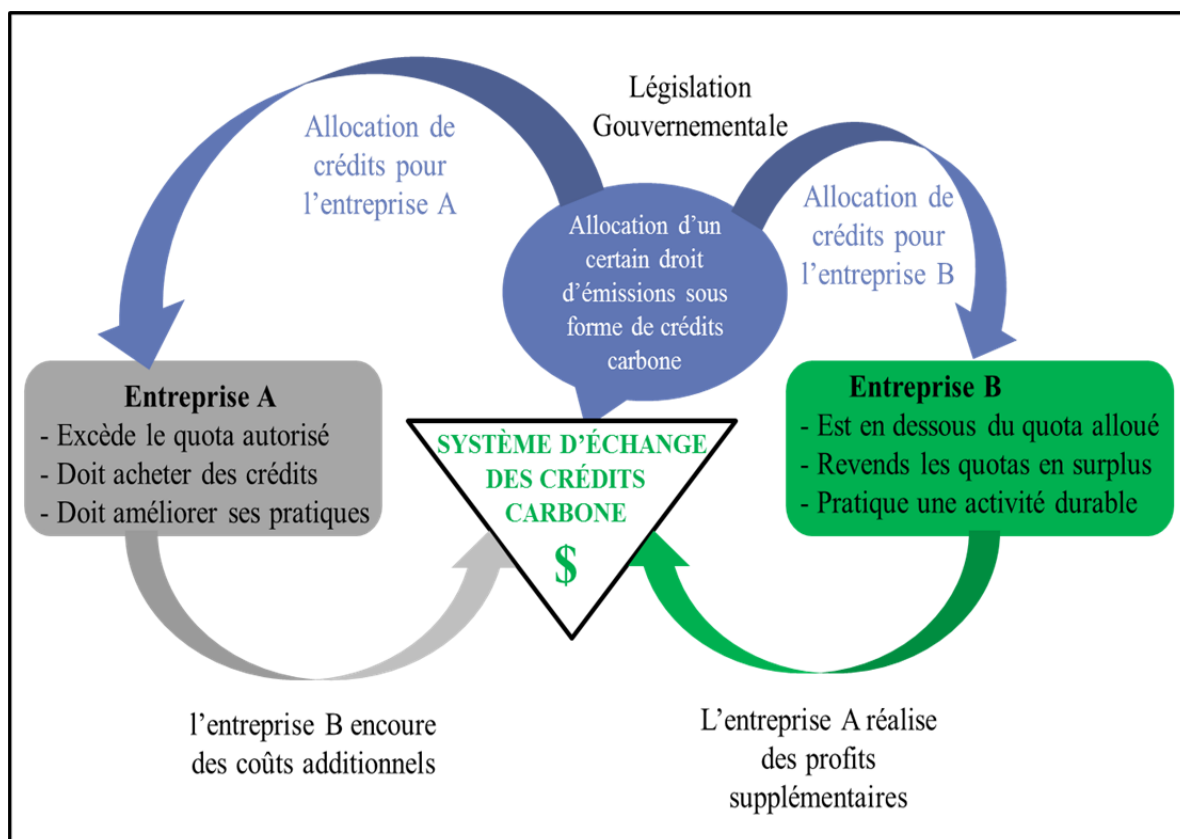


Figure 2.4. Schéma du système traditionnel d'échange des droits d'émissions

### **2.4.2 Mise en place du SPEDE**

Face au refus de ratification du protocole de Kyoto par le gouvernement des États-Unis d'Amérique, on voit l'apparition de plus en plus d'initiatives régionales visant des réductions de GES mises en place depuis le début des années 2000 aux US. De son côté, le Canada, qui a pourtant ratifié le protocole, présente des difficultés à mettre en place un système de réduction efficace compte tenu du refus d'une adoption d'un quelconque règlement au niveau Fédéral pour ne pas affecter le secteur industriel ou pétrolier. Ainsi, ce sont les provinces canadiennes qui ont le devoir de mettre en place leurs propres initiatives dans ce sens, ou encore de rejoindre certains systèmes régionaux américains en place depuis peu. C'est dans cette optique que l'organisation connue sous le nom de Western Climate Initiative (WCI) est formée en 2007 concluant une entente entre les états de Californie, Oregon, Nouveau-Mexique et Washington. Le système de plafonnement et d'échange mis en place attire rapidement certaines provinces canadiennes et c'est ainsi que le Québec et ses voisins à savoir l'Utah, le Manitoba, l'Ontario et la Colombie-Britannique prennent également part à la WCI seulement un an après en 2008, élargissant ainsi cette initiative à l'échelle de l'Amérique du Nord.

Cependant, malgré l'adhésion à la WCI, seule la province du Québec et son partenaire californien ont aujourd'hui instauré des mesures concrètes de réduction des émissions de GES sur leur territoire respectif, à savoir le système de plafonnement et d'échange des droits d'émissions (SPEDE). Le règlement sur le SPEDE, officiellement en place depuis décembre 2012 s'est appliqué à harmoniser les marchés québécois et californien (car de tailles très différentes) ainsi qu'à établir les quotas d'émissions des entreprises assujetties au SPEDE pour les années à venir, à savoir entre 2013 et 2020. La structure du système mis en place se compose de trois (3) périodes appelées périodes de conformité. Une première de deux années pour 2013-2014, et les deux suivantes de trois années : 2015-2016-2017 ainsi que 2018-2019 et 2020. Si une entreprise est assujettie au SPEDE alors elle doit désormais comptabiliser ses émissions durant chaque année et par la suite envoyer un rapport détaillé au gouvernement dans le courant de l'année n+1 suivant la fin de la période de conformité considérée.

Une entreprise est assujettie au système si elle réunit les deux (2) conditions suivantes :

- 1- Avoir une activité dans un secteur visé par le règlement du SPEDE selon la période de conformité considérée.
- 2- Émettre annuellement une quantité supérieure ou égale à 25 000 tonnes métriques de GES.

### **2.4.3 Impact potentiel sur les entreprises québécoises**

C'est ainsi qu'aujourd'hui, nous entrons au Québec dans la seconde période de conformité. Les résultats des achats de crédits pour la première période seront bientôt établis et le prix de vente moyen d'un crédit carbone correspondant à une tonne métrique de CO<sub>2</sub> libéré sera désormais connu pour le SPEDE. D'ores et déjà, les compagnies québécoises affichent leur inquiétude concernant leur capacité à demeurer compétitives alors qu'elles sont pour le moment les seules sur le territoire canadien à faire face à des achats de crédits carbone à des prix potentiellement élevés.

Plusieurs estimations ont été réalisées à ce jour quant aux coûts des crédits carbone au sein de la bourse d'échange du SPEDE de la WCI. Premièrement, la WCI a réalisé sa propre estimation (WCI, 2012) et se prononce sur un prix avoisinant 35 \$ la tonne pour 2015 avec une augmentation allant jusqu'à 55 \$ la tonne à la fin de la troisième période de conformité en 2020. *Point Carbon* a également estimé que le partenariat entre le Québec et la Californie allait provoquer une hausse du crédit carbone à hauteur de 60 \$ d'ici 2020 (Deloitte, 2012). Quant à l'étude réalisée par la Banque Mondiale, elle annonce une demande en crédits supplémentaires si élevée que le prix de la tonne serait propulsé à un taux pouvant monter jusqu'à 131 \$ l'unité (Kossov *et al.*, 2012). Il est clair que dans ces conditions, la compétitivité des entreprises québécoises est en jeu et l'impact financier potentiel du SPEDE devrait être considéré attentivement par les entreprises lors de la planification de leurs activités.

## **2.5 Conclusion**

Ce chapitre présente une introduction à la prise de conscience de l'industrie de cette fin XX<sup>e</sup> et début XXI<sup>e</sup> siècle par rapport à une nécessité de faire évoluer les pratiques actuelles afin d'assurer un développement plus responsable et durable de notre société. Afin de s'assurer d'un tel changement, les gouvernements à travers le monde mettent aujourd'hui en place des lois environnementales de plus en plus strictes afin de contraindre l'industrie à une telle évolution. Le chapitre suivant présente une revue de la littérature des travaux de recherche au sujet des pratiques d'approvisionnement durable les plus fréquentes.

## **CHAPITRE 3**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

#### **3.1 Introduction**

Ce chapitre présente une revue de la littérature de la chaîne d'approvisionnement durable. Dans un premier temps, nous faisons un état de l'art pour un meilleur aperçu général des pratiques de développement durable associées à la chaîne d'approvisionnement et par la suite, nous porterons l'accent sur certains secteurs clés spécifiques en rapport avec notre travail de recherche.

Nous avons choisi de consacrer une partie de cette revue à la logistique inverse. Premièrement, il s'agit à ce jour du domaine le plus souvent abordé à travers la littérature et surtout, il touche directement le sujet de notre travail de recherche puisque la loi sur la compensation finance les services de collecte municipaux. Aussi, en accord avec l'étude des limitations d'émissions de GES récemment instaurées par le SPEDE québécois, les travaux s'intéressant aux gaz à effet de serre seront abordés. Aussi, nous traiterons de plusieurs autres activités ayant un rôle prépondérant au sein de la chaîne logistique et permettant dans de nombreux cas de faire la différence entre une gestion durables ou non des opérations : l'approvisionnement chez les fournisseurs, la production aux usines manufacturières et le secteur des transports qui est à la fois un acteur inévitable lorsqu'on parle de logistique, mais aussi l'un des principaux responsables des dommages causés à l'environnement de nos jours à cause des GES relâchés dans l'atmosphère. Enfin, avant de terminer cette revue de la littérature par une brève conclusion, nous établirons une synthèse des principales modélisations rencontrées ainsi que des résolutions le plus souvent proposées par les différents auteurs. Cette revue de la littérature ne prétend bien entendu pas être exhaustive. Cependant, elle a pour but d'aborder certains domaines précis directement en rapport avec la modélisation réalisée dans le Chapitre 3.

### 3.2 Penser durable, une évolution nécessaire

Depuis le début des années 1990, il y a plus de 25 ans maintenant, le concept de logistique durable commence à susciter l'intérêt général aussi bien au sein de la communauté scientifique que chez les industriels. On commence à parler pour les premières fois des trois (3) dimensions de la chaîne d'approvisionnement : économique, environnementale et sociale comme le montre la figure 3.1 (Elkington, 1998). Du côté de la recherche, on note un accroissement des publications et si l'on regroupe tous les articles touchant de près ou de loin l'aspect durable de la chaîne logistique on trouve plus de 500 papiers sur le sujet de 1995 à 2011 (Min et Kim, 2012). Parmi ces travaux, presque deux tiers (64 %) traitent des sujets abordés dans cette revue de la littérature à savoir l'approvisionnement durable, la production durable et la logistique inverse. Sur une période de trois (3) ans entre 1994 et 1997, le nombre de travaux publiés passe de moins d'une dizaine (Seuring et Müller, 2008) à plus de 100 publications entre 2007 et 2010 (Seuring, 2012).

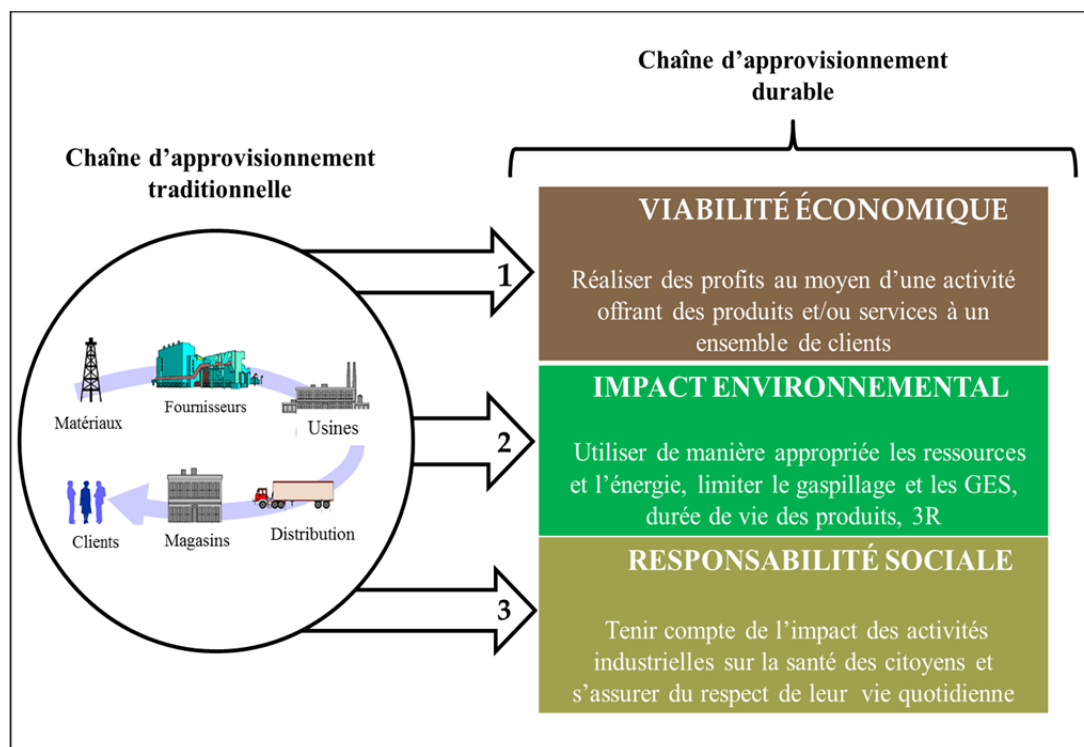


Figure 3.1. Les trois piliers de la chaîne d'approvisionnement durable



Malgré le fait que les études réalisées par les académiciens présentent dans la plupart des cas des résultats bénéfiques (Seuring, 2012), les entreprises rencontrent des difficultés à évoluer principalement pour les raisons suivantes : coûts de changements trop élevés, complexité de réalisation, manque de communication entre les différents acteurs de la chaîne (Seuring et Müller, 2008). Néanmoins, la vision collective de la logistique classique telle qu'on la connaît (Beamon, 1999) est en train de changer et les incitations sont nombreuses : consommateurs, managers, actionnaires, groupes environnementaux, législations gouvernementales et même parfois à la demande des employés (Carter et Easton, 2011). Il n'est cependant pas toujours nécessaire de contraindre les dirigeants de la chaîne d'approvisionnement à une telle évolution car nombre d'entre eux ont leur propre motivation, il peut s'agir de la recherche d'un retour financier positif (Srivastava et Srivastava, 2006) ou bien tout simplement d'une volonté de faire ce qui est juste pour le bien de l'environnement par pure conviction (Wu et Dunn, 1995). En fait, considérant les investissements requis pour évoluer vers des opérations durables, les entreprises les plus à l'aise sont plutôt les grosses multinationales car elles ont une marge de manœuvre que ne possèdent pas les PME faute de budget. C'est pourquoi ce sont les géants de l'industrie qui donnent l'exemple et s'alignent progressivement avec les meilleures pratiques dont on entend souvent parler : « greening the supply chain », « green operations », « reducing waste », « eco-design », « reduce green house gases emissions », « reverse logistics », *etc.* (Srivastava, 2007).

Chen *et al.*, (2013) nous en donne quelques exemples : Stonyfield, le leader mondial de la fabrication de yaourt qui en révisant ses tournées de véhicules parvient à diminuer de 95 % ses transports en LTL (*Less Than Truckload*) ce qui a conduit à une économie des ressources en énergie et en fuel à hauteur de 2.5 millions de dollars. Xerox, géant de l'industrie de l'imprimante qui a décidé en 1991 de se pencher sur les techniques de récupération, remise à neuf et recyclage de ses imprimantes parvient à sauver de l'enfouissement quelques 73 mille tonnes de composants sur une période de 12 ans d'après un bilan effectué en 2003. Xerox est d'ailleurs l'un des pionniers industriel du recyclage et de la mise en place effective d'un programme de logistique inverse au début des années 1990. Au jour d'aujourd'hui, 100 % des imprimantes ont un design adapté au recyclage et 60 % des composants peuvent être

réutilisés ce qui entraîne des économies de matières premières, d'énergies, et réduit l'impact global de l'entreprise sur l'environnement. Il est mis en évidence assez rapidement que beaucoup de chaînes d'approvisionnement ont du mal à améliorer leurs pratiques à cause de la piètre collaboration avec leurs partenaires, et notamment avec leurs fournisseurs (Simpson et Power, 2005). C'est par exemple le cas de la multinationale Levi Strauss, qui a été la première au début des années 1990 à établir une charte des valeurs et exigences environnementales obligatoires. Chacun des fournisseurs partenaires avaient pour obligation de signer ce document, certifiant ainsi du respect des exigences environnementales établies par le géant du textile.

C'est ainsi qu'après l'éco-design des produits manufacturés apparaissent d'autres centres d'intérêts au cœur de la recherche comme la remise à neuf et la réutilisation des produits mis sur le marché afin de créer une valeur ajoutée en fin de cycle de vie (Guide et Wassenhove, 2001). Aussi, certains auteurs se sont intéressés à l'impact des réglementations environnementales sur l'attitude des chaînes d'approvisionnement dans le cadre du principe de responsabilité élargie des producteurs. On parle parfois d'investissement dans un éco-design qui permettrait la réutilisation des produits (Subramanian *et al.*, 2009) ou plus simplement de l'évolution des réglementations au sujet des récupérations des produits en fin de vie par les entreprises (Atasu *et al.*, 2010). Depuis les deux dernières décennies les pressions environnementales augmentent et les gouvernements font tout pour inciter les compagnies à considérer l'aspect durable en première ligne de conduite de leur management logistique (Gungor et Gupta, 1999). Certains auteurs considèrent même que ces lois amènent certains dirigeants à tenir compte de l'aspect durable dès la phase de décision stratégique pour les années à venir (Handfield *et al.*, 1999).

Les champs d'études sont multiples dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement durable. Qu'il s'agisse de l'étude de la logistique inverse (Shih, 2001), de l'analyse du cycle de vie (Arena *et al.*, 2003) ou bien encore de la gestion des émissions de carbone (Chaabane *et al.*, 2011), les mauvaises pratiques industrielles sont bien réelles et elles ne demandent qu'à être changées.

### **3.3 Principales activités en logistique durable**

#### **3.3.1 Éco-conception des produits**

Le concept d'éco-conception des produits est parmi les premiers à faire son apparition (Navin-Chandra, 1991), depuis, ce concept est étudié avec attention dans la littérature. En effet, le design des produits est d'une importance capitale puisqu'il impacte de nombreux secteurs de la chaîne d'approvisionnement tels que les transports et la distribution, le stockage dans les infrastructures logistiques, la logistique inverse et bien d'autres (Seuring et Müller, 2008). Ce travail souligne l'importance de l'éco-conception des produits proposés à un panel de consommateurs de plus en plus exigeants quant à l'image de la marque, ainsi que l'impact potentiel d'une telle activité sur la réputation de l'entreprise. Plusieurs travaux plus récents se sont intéressés à la chaîne d'approvisionnement durable à travers une approche centrée sur le produit en lui-même (Srivastava, 2007; Carter et Rogers, 2008; Pagell et Wu, 2009), et les auteurs se rejoignent sur plusieurs points. Par exemple, lorsqu'on parle d'éco-design des produits on fait souvent référence à la nécessité de collaboration étroite entre la compagnie et ses fournisseurs. On parle même de mettre en place des objectifs environnementaux à respecter et d'évaluer ses fournisseurs pour être en mesure de sélectionner les meilleurs d'entre eux (Gold *et al.*, 2010). La pratique a d'ailleurs montré que la mise en place d'une évaluation stricte des fournisseurs sur la base de critères environnementaux peut s'avérer efficace comme pour le cas de l'entreprise Levi Strauss (Chen *et al.*, 2013).

Au jour d'aujourd'hui, l'outil de loin le plus populaire quand il s'agit d'étudier l'impact du design d'un produit sur l'environnement est l'analyse du cycle de vie (ACV). Cette approche permettant d'évaluer l'impact d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie est utilisée dans plus de 80 % des publications comportant une étude quantitative de la chaîne d'approvisionnement durable (Seuring et Müller, 2008) et cette technique s'avère être un outil de planification des activités logistiques extrêmement efficace (Benedetto et Klemes, 2009). Si l'on en croit Maxwell *et al.*, (2003), le design des produits devrait être un paramètre à considérer dès la phase stratégique de conception du réseau logistique. Les décisions de

design du réseau logistique et de design du produit sont considérées simultanément pour une des premières fois à travers le modèle mathématique développé par Krikke *et al.*, (2003). Parmi les travaux de recherches les plus connus sur l'application de l'ACV, Hugo et Pistikopoulos (2005) ont mis en place un modèle de programmation linéaire qui prends en compte les choix stratégiques de conception du réseau logistique combiné à des décisions de planification tactiques.

Concernant des travaux plus récents, Tseng *et al.*, (2013) utilisent un modèle mathématique de minimisation des coûts permettant le choix du design des produits avec des contraintes relatives aux capacités d'approvisionnement chez chaque fournisseur ainsi que des capacités d'accueil des infrastructures logistiques. Le travail démontre que le choix stratégique des fournisseurs peut être différent selon le design que l'on choisit pour notre produit. Nourira *et al.*, (2014) développe un modèle mathématique linéaire avec le choix des composants du BOM comme variables de décisions afin de répondre à une demande des consommateurs selon la nature des produits proposés, modélisant la corrélation entre demande et produits standards versus produits verts. Claypool *et al.*, (2014) étudient simultanément les risques de la chaîne d'approvisionnement combinés aux risques de développement d'un nouveau design de produit. Le programme linéaire en nombres mixtes (MIP) considéré tient compte de la fiabilité des fournisseurs ainsi qu'aux délais de satisfaction de la demande.

### 3.3.2 Approvisionnement durable

Cette activité logistique est aujourd'hui une priorité et un facteur de durabilité de premier plan pour un nombre croissant de managers et de responsables en approvisionnement (Miemczyk *et al.*, 2012). D'ailleurs, selon Krause *et al.*, (2009), le niveau de durabilité d'une chaîne logistique ne peut s'évaluer mieux qu'à travers sa politique d'approvisionnement. Bien que la dimension sociale soit abordée par très peu de travaux (Besser *et al.*, 2006; Worthington *et al.*, 2008), certains auteurs lorsqu'ils se réfèrent aux pratiques d'approvisionnement n'hésitent pas à parler d' « achats socialement responsables » (Park et Stoel, 2005) ou même de comportement éthique (Preuss, 2009). Il existe de multiples

approches dans la littérature et une définition unique ne semble pas s'imposer. C'est ainsi que certains auteurs en parlent comme d'une manière de réaliser les achats d'une organisation en tenant compte des conséquences sur le public (Drumwright, 1994). Plus simplement, cette activité est parfois aussi définie comme ayant pour objectif d'atteindre ou d'excéder les normes de la société (Eltantawy *et al.*, 2009) ou enfin pour la définition la plus simple, l'approvisionnement est durable s'il est en accord avec les principes du développement durable et respecte les limites environnementales établies (Walker et Brammer, 2009).

La provenance d'un produit, les matières premières dont il est composé, sa durée de vie utile ou encore les possibilités de réutilisation et de recyclage qu'il offre sont autant de composantes d'un approvisionnement dit durable. La majorité des travaux de recherche sur le sujet adoptent un point de vue environnemental et traitent principalement de la gestion du gaspillage et de l'énergie utilisée en fonction de la matière première sélectionnée (Zhu et Sarkis, 2007; Holt *et al.*, 2009). En effet les choix d'approvisionnement vont engendrer un impact certain sur l'environnement à cause de facteurs multiples comme les émissions de carbone, le gaspillage et la consommation en énergie nécessaire lors du processus de fabrication (Lu *et al.*, 2007). Du côté de l'industrie, c'est dans cette optique qu'un nombre grandissant d'entreprises choisissent de collaborer étroitement avec leurs fournisseurs comme le géant mondial du textile Levi Strauss mentionné plus haut. Elles mettent en place des listes de critères environnementaux à respecter dans le cadre de cette collaboration (Humphreys *et al.*, 2003) ainsi qu'un contrôle permanent de la qualité proposée par leurs fournisseurs (Hamprecht, 2005). On note aussi l'exemple de la compagnie Patagonia qui décide en 1996 de passer de l'utilisation du coton conventionnel au coton organique pour des raisons de pollution, pesticides, *etc.* (Chen *et al.*, 2013). Cette décision a conduit l'entreprise à relocaliser la totalité de ses approvisionnements de l'Inde vers les États-Unis et à changer de fournisseurs partenaires. De même, le géant de l'industrie du fast-food *McDonalds* était au centre de la critique en 1989 à cause de l'utilisation de polystyrène dans ses emballages. La pression des groupes environnementaux et des consommateurs a conduit la multinationale à stopper toutes relations avec ses fournisseurs de polystyrène en 1990. Malheureusement, ce

genre de mesure radicale pour évoluer vers une chaîne d'approvisionnement durable n'est pas sans risques (Srivastava, 2007; Seuring et Müller, 2008) comme le montre l'exemple de la compagnie « Nau », fabricant américain de vêtements depuis 2005 dont le programme d'approvisionnement durable n'a pas fonctionné puisque l'entreprise a fait faillite et a dû cesser son activité en 2008.

Bien qu'initialement en pratique on déplorait des relations uniquement bilatérales entre fournisseurs et acheteurs, il est aujourd'hui commun d'adopter un point de vue plus global et de considérer la chaîne d'approvisionnement dans son intégrité (Carter et Rogers, 2008; Mollenkopf *et al.*, 2010). Certains auteurs parlent même de l'importance de tenir compte des activités des autres chaînes d'approvisionnement (Araujo et Harrison, 2002), ce qui conduit ces derniers temps la recherche à s'intéresser au concept de symbiose industrielle qui consiste à utiliser les extrants d'une activité comme intrants d'une autre. (Bansal et McKnight, 2009). Bien que ce concept soit encore à ses débuts, il présente toutefois un avenir prometteur pour la recherche appliquée à l'industrie.

### **3.3.3 Production durable**

Après les achats de matières premières, de composants et autres pièces nécessaires, vient l'étape de la fabrication des produits finis aux usines manufacturières. Cette partie de la chaîne d'approvisionnement est sans aucun doute l'une de celles qui présente l'impact le plus important sur le monde qui l'entoure. En effet, si l'on en croit Garetti et Taisch (2012), un exemple très parlant est celui de l'Europe, continent au sein duquel les activités de production représentent indirectement plus de 70 % des emplois de l'industrie. De ce constat, il est évident que si l'on considère que durabilité est synonyme de préserver, conserver, maintenir (Duque Ciceri *et al.*, 2009), alors la chaîne d'approvisionnement durable et la production durable sont deux (2) concepts difficilement dissociables. Si l'on en croit les estimations (Unesco, 2009), la population mondiale devrait atteindre 9 milliards d'habitants en 2050, et possiblement 11 milliards d'ici 2100. Autant dire que la disponibilité

des ressources naturelles utilisées lors de l'étape de production représente un enjeu critique de ce XXI<sup>e</sup> siècle.

Le facteur déterminant lorsqu'on parle de production durable est le choix de la technologie utilisée. En effet, il y a un potentiel énorme dans le domaine des hautes technologies mais celles-ci sont souvent très coûteuses et utilisées pour des produits dont le cycle de vie est de plus en plus court et deviennent obsolètes de plus en plus rapidement. La gestion de la maintenance des technologies de production occupe ainsi une place importante (Ellram *et al.*, 1998) et ces derniers temps la recherche scientifique s'oriente vers l'étude de la maintenance préventive (Levrat *et al.*, 2008), ce qui permettrait d'optimiser l'utilisation des ressources manufacturières (Kiritsis *et al.*, 2008). Un meilleur plan de maintenance prolonge la durée de vie utile des équipements manufacturiers, diminue le risque d'accidents et d'arrêts de production et augmente le niveau de sécurité des employés. Ainsi une maintenance préventive efficace permet non seulement un gain économique, mais cela représente également une amélioration du point de vue environnemental et social (Fumagalli *et al.*, 2009).

C'est ainsi que la plupart des travaux de recherche se focalisent sur l'optimisation des systèmes de production, comme celui de Wu et Chang (2004) qui proposent un modèle multi-objectif d'optimisation de la planification de production sous incertitudes. D'une part on cherche à minimiser les coûts et d'autre part à maximiser la capacité de production dans le secteur de l'industrie du textile avec la prise en compte de certains coûts environnementaux. Toujours dans l'industrie du textile, Radulescu *et al.*, (2009) proposent cette fois-ci deux (2) modélisations différentes pour la planification de production sous incertitudes. Les deux modèles s'inscrivant sous le thème de prévention de la pollution, l'un permet de maximiser le profit réalisé tandis que l'autre minimise le risque de pollution. Un an plus tard, Chen et Monahan (2010) effectuent une comparaison entre deux (2) scénarios : le premier considère le cas d'une compagnie dont la production est sujette à des réglementations environnementales strictes tandis que le second analyse le cas d'une politique de production avec un objectif environnemental fixé volontairement.

Parmi les travaux de recherche les plus récents, certains auteurs prennent en considérations les technologies de production en parallèle avec les émissions de gaz à effet de serre. C'est le cas par exemple de Drake *et al.*, (2012) dont l'étude considère dans un premier temps le commerce des crédits de carbone pour revenir par la suite à une simple taxe applicable selon le niveau d'émissions. La modélisation mise en place et dont l'objectif est de maximiser les profits de l'entreprise donne le choix entre l'utilisation d'une ou plusieurs technologies de production pouvant être standard ou propre. Par la suite, les différentes politiques de gestion du carbone sont reprises et comparées par Jaber *et al.*, (2013) dont l'étude inclut les émissions des processus manufacturiers de la chaîne d'approvisionnement. Krass *et al.*, (2013) viendra enrichir la littérature avec un modèle d'optimisation qui tient compte de la sélection de la technologie, des quantités de production optimales ainsi que de la variation des prix applicables aux produits finis selon la nature de la demande. Enfin, Nouira *et al.*, (2014) développe deux (2) modèles d'optimisation considérant d'une part le choix de la technologie de production et des matières premières mais il modélise également pour la première fois la corrélation entre la demande et la nature des produits manufacturés, selon s'il s'agit de produits standard ou de produits verts.

### 3.3.4 Transport durable

Le secteur des transports est d'une grande importance car de son efficacité dépend le bon fonctionnement de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Les infrastructures logistiques (nœuds du réseau) sont toutes interconnectées par les transports (arcs du réseau). De plus, il est établi que les transports présentent l'impact le plus important de la chaîne d'approvisionnement sur les émissions de gaz à effet de serre (GES). Plusieurs travaux de recherches ont montré des réductions significatives d'émissions de GES grâce à l'utilisation de bioéthanol ou de biodiesel en remplacement du fuel traditionnel (Kim et Dale, 2002; Punter *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Blottnitz *et al.*, 2007). Aussi, la consolidation des livraisons a reçu une certaine attention (Cheung *et al.*, 2003, Ergun *et al.*, 2007) et permet parfois une réduction des coûts à travers une meilleure gestion des stocks tout en augmentant le niveau de service (Hageback et Segerstedt, 2004). Plus récemment, Klundert *et al.*, (2010)



proposent un modèle mathématique linéaire combiné à des heuristiques dans le but d'améliorer l'utilisation des transports lors des livraisons. Des études plus récentes s'intéressent également à la collaboration entre chaînes d'approvisionnement et à l'impact potentiel sur les émissions de GES et sur les coûts de transports en combinant plusieurs modes : routier et ferroviaire (Pan *et al.*, 2013). Harris *et al.*, (2011) analysent la relation entre les émissions de GES et les dépôts effectués pour l'entreposage des marchandises permettant ainsi le stockage temporaire des livraisons ainsi que les changements de modes de transports. Abramovic *et al.*, (2012) présentent un modèle mathématique qui maximise le revenu dans le secteur des transports publics et analysent la dimension sociale à travers le confort des passagers durant leur temps de transports selon la durée assise versus la durée debout. Wang *et al.*, (2011) proposent un modèle mathématique multi-objectifs de minimisation des coûts et de l'impact environnemental considérant également le secteur des transports, les auteurs encouragent pour de futurs travaux à considérer les changements de modes et les incertitudes au niveau de la demande. Bien que les transports représentent une problématique incontournable de la chaîne logistique, on déplore aujourd'hui un manque de modèles quantitatifs appliqués directement à ce secteur (Brandenburg *et al.*, 2014).

### **3.3.5 La logistique inverse**

Il s'agit sans aucun doute de l'aspect le plus étudié dans la littérature au sujet de la chaîne d'approvisionnement durable (Rubio *et al.*, 2008). De manière générale, les principales motivations liées à l'implémentation de la logistique inverse au sein d'une compagnie sont la recherche d'un retour financier positif, ou bien l'obligation découlant des législations en place (De Brito *et al.*, 2003). Ceci n'est guère étonnant car cette activité est en effet d'une grande importance puisqu'elle touche une partie cruciale du cycle de vie du produit, c'est-à-dire la fin de son utilisation par les consommateurs. De manière générale, le processus de logistique inverse, dont la complexité est montrée en figure 3.2, comprend plusieurs activités telles que la collecte, l'inspection, le tri, la remise à neuf, le recyclage, et la réutilisation (Fleischmann *et al.*, 1997 et Fleischmann, 2000).

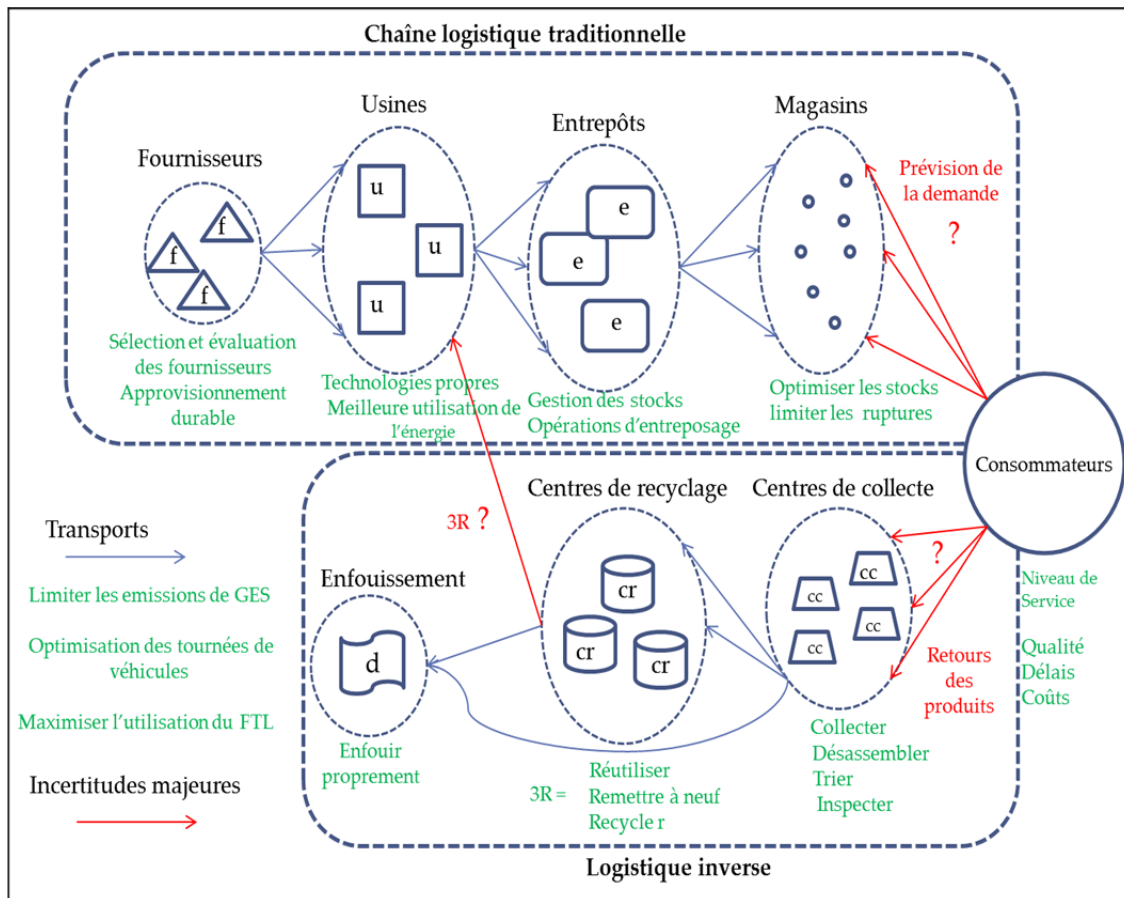


Figure 3.2. La complexité ajoutée par la logistique inverse

Comme auparavant, les managers font face à des décisions d'ordres différents (Pochampally, 2009) : des décisions stratégiques (impact à long terme, sur plusieurs années), des décisions tactiques (impact à moyen terme, de quelques semaines à une année) ainsi que décisions opérationnelles (impact court terme, pouvant être immédiat). Bien que les modélisations associées aux chaînes d'approvisionnement en boucle fermée soient sensiblement différentes du cas classique (Fleischmann, 1997), le concept reste le même et les décisions stratégiques de localisation des infrastructures logistiques telles que les centres de collecte et de recyclage doivent être prises en phase de conception du réseau (Srivastava, 2008). C'est ainsi que la logistique inverse vient complexifier la chaîne d'approvisionnement car toutes les décisions habituelles relatives aux transports et aux flux entre les bâtiments logistiques (Lieckens *et al.*, 2007), les questions relatives aux quantités de stockage, aux capacités des infrastructures, questions d'expansions et autres viennent s'ajouter. Quoi qu'il en soit de la complexité et de

la mise en pratique, la logistique inverse ne décourage pas pour autant et elle est même considérée comme un facteur majeur de contribution à la durabilité de la chaîne d'approvisionnement (Kleindorfer *et al.*, 2005). Non seulement elle permet de diminuer grandement le recours à l'enfouissement, mais aussi les produits remanufacturés ont cet avantage de nécessiter moins d'énergie et donc d'émettre moins de CO<sub>2</sub> (Lapkin *et al.*, 2004). De plus, dans certains secteurs particuliers de l'industrie, les émissions de substances dangereuses comme le zinc, le benzène ou encore l'arsenic sont à éviter à tout prix pour l'environnement (Park *et al.*, 2008). Un des avantages de la logistique inverse étant qu'elle est applicable à de nombreux types d'industries comme les imprimantes (Krikke *et al.*, 1999), la téléphonie mobile (Guide *et al.*, 2005), l'automobile (Gerrard *et al.*, 2007) ou encore l'industrie de l'aviation (De Brito *et al.*, 2007) et de l'électronique (Kumar et Putnam, 2008), cela vient aussi avec l'inconvénient du nombre de législations qui s'y appliquent (Papageorgiou, 2009).

En effet comme mentionné plus haut, les réglementations gouvernementales constituent l'une des raisons principales du changement d'attitude des compagnies en activité aujourd'hui et c'est particulièrement le cas des réglementations s'inscrivant dans le cadre de la responsabilité élargie des producteurs (REP). Ce principe bien connu lorsqu'on parle de logistique durable consiste à tenir le manufacturier responsable du traitement des marchandises qu'il met sur le marché à disposition des consommateurs à la fin de leur cycle de vie (Souza, 2012). Parmi les plus connues concernant l'industrie des produits électriques et électroniques figure la loi WEEE (*Waste Electrical and Electronic Equipment*) devenue une loi européenne depuis 2003. La législation WEEE a été mise en place dans le but d'imposer aux entreprises concernées la collecte et le recyclage d'un pourcentage minimum des produits qu'elles fabriquent et mettent sur le marché à la disposition des consommateurs. Les résultats n'étant pas pleinement satisfaisants, des révisions de la directive WEEE ont eu lieu en 2006, en 2009 puis finalement en 2012 pour la plus récente révision par le conseil européen. De telles mesures existent également dans d'autres secteurs industriels à l'image de la directive *End of Life Vehicle* (ELV) qui comme son nom l'indique touche l'industrie de l'automobile (Zhu *et al.*, 2007). Cette directive visant à inciter les fabricants de véhicule à

utiliser des matériaux et composants plus simples à réutiliser et à recycler connaît son homologue au sein des législations américaines comme canadienne.

Parmi les principaux travaux présentant des modélisations quantitatives dans le domaine de REP, Jacobs *et al.*, (2012) présentent une formulation mathématique de chaîne logistique en boucle fermée à deux échelons prenant en compte des flux de produits neufs et recyclés. Leur analyse permet de conclure que la collaboration entre partenaires de la chaîne d'approvisionnement est plus rentable que si les deux types de flux sont gérés séparément. Atasu *et al.*, (2010) étudient un modèle multi-périodes de chaîne d'approvisionnement mettant sur le marché un produit avec possibilité de remise à neuf en fin de cycle de vie utile. Le manufacturier a un choix à faire entre deux types de design qui présentent chacun des coûts différents : le premier est associé à la performance du produit fini et a un impact direct pendant le cycle de vie du produit. Tandis que le second critère augmente les chances de rendre possible la remise à neuf du produit, affectant ainsi directement l'impact environnemental de ce dernier et l'étape post cycle de vie. Dans ce travail, les auteurs émettent l'hypothèse que le manufacturier et le client partagent les coûts associés au second critère environnemental. L'impact des choix de conception du produit sur le profit réalisé est mis en évidence, parvenant à la conclusion qu'une partie des coûts encourus durant la phase d'utilisation du produit auraient pu être évités s'ils avaient été mieux employés dans la phase de design du produit. De plus, les auteurs portent l'accent sur les avantages apportés par une collaboration entre le manufacturier et les clients.

### **3.4 Chaîne d'approvisionnement et gaz à effet de serre**

Depuis la ratification du protocole de Kyoto en 1997 par plus de 180 états, il est désormais clair aux yeux du grand public (chercheurs, industriels, citoyens) que les émissions de gaz à effet de serre représentent le principal danger quant au réchauffement climatique de notre planète (Pinto *et al.*, 2012). Ainsi le début du XXI<sup>e</sup> siècle a vu naître un intérêt croissant dans le domaine de la recherche et le nombre de publications sur le sujet a considérablement augmenté au fil des années. En effet, cet aspect est d'autant plus important qu'il est présent

dans chaque activité de la chaîne logistique. Premièrement, plusieurs travaux s'intéressent aux émissions de GES directement en phase de décision stratégique de design du réseau logistique. Cela peut être dans le cas de la chaîne d'approvisionnement classique pour un problème de localisation d'usines (Hugo *et al.*, 2005) ou bien dans le cas de la logistique inverse pour la localisation de centres de collecte et de recyclage (Min *et al.*, 2006). Aussi, en plus de la localisation stratégique de bâtiments logistiques il peut s'agir d'un niveau de décision tactique d'allocation de capacités d'usines ou de centres de distributions (Abdallah *et al.*, 2010). De nombreux travaux portent également un intérêt particulier pour le choix de la technologie de production, comme ceux dont les approches de résolution sont mentionnées plus haut sous la section « production durable », (Drake *et al.*, 2012; Jaber *et al.*, 2013; Krass *et al.*, 2013). Ainsi, lorsqu'on parle d'investissement dans une nouvelle technologie, il est important de peser le pour et le contre entre l'aspect économique et l'aspect environnemental afin de décider si un investissement est nécessaire ou non. C'est dans cette logique que Wang *et al.*, (2011) n'hésitent pas à instaurer le terme de « niveau de protection environnemental ». Les investissements dans de nouvelles technologies étant souvent très élevés, il est d'ordre commun de considérer qu'ils appartiennent aux décisions stratégiques. Cependant plusieurs travaux centrés sur les émissions de carbone s'intéressent à l'aspect tactique de la production plutôt qu'à l'aspect stratégique. À cette échelle, on ne parle plus d'investissement ou bien d'agrandissement d'infrastructures mais plutôt de planification de production (Nouira *et al.*, 2014). De nombreux travaux étudient également le gaspillage des ressources, comme par exemple dans le secteur de l'industrie automobile (Duval *et al.*, 2007) ou de l'électronique (Ravi, 2012). L'approche d'analyse du cycle de vie est très utilisée dans ce domaine (*Life Cycle Assessment* - LCA) comme par exemple dans le travail de Chaabane *et al.*, (2011) qui analyse les émissions de GES en relations avec les gaspillages solides et liquides découlant des activités de production aux usines dans le secteur de l'aluminium.

Un certain nombre d'études touchent le secteur des transports, principal émetteur de GES de la chaîne d'approvisionnement. Parfois les émissions sont en rapport avec la consolidation des livraisons conduisant ainsi à se poser la question du compromis entre coûts de transports et émissions (Winebrake *et al.*, 2008). Bauer *et al.*, (2008) tentent de minimiser le niveau

d'émissions des transports au moyen d'un modèle mathématique linéaire en nombres mixtes (MILP), tandis que Hoen *et al.*, (2012) comparent les différents niveaux d'émissions selon les modes de transports et parviennent à établir la corrélation entre le niveau d'émissions et les caractéristiques des produits transportés. Lorsqu'on parle de GES, on rencontre aussi nombre de travaux comportant une modélisation de type multi-objectifs, avec à la fois des considérations économiques et environnementales (Hugo et Pistikopoulos, 2005; Neto *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011). Au niveau gouvernemental, on rencontre différents types de politiques au sujet des régulations d'émissions de GES, il peut s'agir d'une taxe carbone (Lam *et al.*, 2010) ou bien de l'application d'une limite fixe que l'on ne peut excéder (Shaw *et al.*, 2012). Aussi, des mécanismes plus perfectionnés sont mis en place tels que le marché de la bourse carbone qui permet d'acheter des crédits en déficits comme de revendre des crédits excédentaires (Chaabane *et al.*, 2012). Parmi les travaux les plus récents, certains comparent les différentes politiques existantes et mettent en évidence leurs impacts sur les décisions d'approvisionnement, de production et de gestion des stocks (Benjaafar et Daskin, 2013). Enfin, Palak *et al.*, (2014) évaluent au moyen de plusieurs modèles mathématiques l'impact de ces mécanismes de contrôle des émissions (taxe, cap, marché du carbone, *etc.*) sur la performance de la chaîne d'approvisionnement en définissant la corrélation entre le niveau d'émission et les distances parcourues, le poids transporté, et le mode de transport choisi. Fahimnia *et al.*, (2013) publie une étude de cas réalisée en Australie lors de laquelle la résolution de leur modèle mathématique non linéaire permet de réduire les coûts de la taxe carbone encourus par la chaîne d'approvisionnement ainsi qu'une amélioration des décisions de l'entreprise au niveau des investissements à effectuer.

### **3.5 Approches envisagées**

Il existe une grande variété d'approches possibles lorsqu'on parle de modéliser la chaîne d'approvisionnement durable. Parmi celles-ci, la tendance de ces dernières années de recherche nous indique que l'analyse du cycle de vie (LCA), l'analyse multicritères (*Multi Criteria Decision Making* - MCDM), la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ainsi que la programmation linéaire sont les plus souvent utilisées (Brandenburg *et al.*, 2014).

Contrairement aux autres approches, la méthode LCA est centrée sur le produit en lui-même (Hunkeler *et al.*, 2003). Aussi, elle représente dans plusieurs papiers une première étape pré-optimisation et se concentre en général sur un secteur industriel en particulier (Seuring, 2012). L'intérêt croissant pour l'aspect environnemental de la chaîne logistique a conduit inévitablement à l'étude de la possibilité d'atteindre plusieurs objectifs en même temps (Sheu *et al.*, 2005). En effet, parmi les modélisations mathématiques proposées, rares sont les approches qui optimisent une seule et unique fonction-objectif (Gunson *et al.*, 2010), et dès lors on voit de plus en plus apparaître des modèles d'analyse multicritères et des modèles de programmation linéaire multi-objectifs (MOLP) (Chaabane *et al.*, 2011). Quand certains papiers montrent des situations idéales d'objectifs atteints simultanément (gagnant-gagnant), la grande majorité des résultats observés aboutissent cependant à la conclusion d'une nécessité de compromis (*trade-offs*) entre les objectifs économiques et environnementaux de la chaîne d'approvisionnement (Seuring, 2012). D'autres approches sont en revanche moins utilisées par les académiciens, on déplore par exemple trop peu de modélisations considérant les incertitudes et les approches stochastiques se font rares dans la littérature. Parfois, elles sont considérées du point de vue des transports (Lee *et al.*, 2010), on trouve aussi des études d'implantation éventuelles de nouvelles technologies (Tseng *et al.*, 2009), mais la plupart du temps les modélisations stochastiques sont associées à des problématiques tactiques de planification (Chen *et al.*, 2012). On déplore aussi trop peu d'approches de résolution par algorithmes génétiques ou par programmation dynamique (Radulescu *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2009).

### 3.6 Conclusion

Dans cette première partie, nous avons présenté une revue de la littérature au sujet de la chaîne d'approvisionnement durable. On y trouve les principales activités concernées et les principaux acteurs impliqués dans celles-ci, sans oublier quelques exemples réels d'entreprises ayant fait face à ce défi majeur du XXI<sup>e</sup> siècle. Bien que certaines références soient très récentes (2009-2014), il nous a paru justifié d'y inclure également des références plus anciennes (1990-2008) étant donné que l'intérêt de la communauté scientifique pour la

logistique durable date maintenant de plus de 25 ans. Il ressort de ce travail d'analyse que la pratique de la logistique telle qu'on la connaissait est en train d'évoluer et par la même occasion de se complexifier. De nouveaux défis sont posés par les problématiques environnementales et sociales imposant une remise en question des anciennes pratiques, et la marge de manœuvre laissée aux entreprises est de plus en plus restreinte étant donné l'apparition de nouvelles lois environnementales et le désir croissant des consommateurs de voir leur marque favorite agir de manière responsable. Cependant, si la satisfaction des clients peut être obtenue de bien des façons et laisse le choix aux entreprises des changements à mettre en place, celles-ci disposent d'une moins grande marge de manœuvre lorsqu'il s'agit de lois environnementales ciblant des objectifs particuliers comme les réductions d'émissions de GES, ou encore l'obligation d'un taux minimum de récupération de produits en fin de cycle de vie par l'entreprise qui les met sur le marché. C'est sur ce constat que se base ce travail de recherche, visant à développer un modèle d'aide à la décision ayant pour but d'aider les entreprises assujetties à deux (2) lois en particulier, la compensation aux services de collectes municipaux et les limitations d'émissions imposées par le SPEDE. Le développement d'un tel outil permettrait aux entreprises concernées de réduire de manière significative le montant de la facture environnementale annuelle tout en restant compétitives.



## CHAPITRE 4

### MÉTHODOLOGIE ET DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE D'OPTIMISATION

#### 4.1 Introduction

Ce chapitre présente dans un premier temps la structure de la chaîne d'approvisionnement étudiée dans le cadre de notre étude. Bien que des données plus détaillées au sujet des paramètres utilisés soient fournies dans le chapitre suivant, les principales caractéristiques de la chaîne logistique sont abordées dans cette section. Par la suite, la formulation du modèle mathématique linéaire en nombres entiers est détaillée. Tout d'abord nous présenterons les paramètres et les coûts logistiques considérés. Ensuite, nous détaillerons les expressions mathématiques mises en place pour modéliser la loi sur la compensation ainsi que les limitations d'émissions de gaz à effet de serre. Il est important de préciser deux (2) choses :

- 1) Dans le cadre de la loi sur la compensation, ÉEQ accepte plusieurs méthodes de mesure des poids considérés lors de la déclaration. Ce travail se base sur l'une d'entre elle, c'est-à-dire la méthode ABOM (*Average Bill Of Materials*) et qui consiste à mesurer le poids d'un produit en fonction du poids moyen attribué à ses composants. La figure 4.1 ci-après montre plus en détail le principe de compensation appliqué à la chaîne d'approvisionnement étudiée.
- 2) La modélisation mathématique des émissions de GES utilisée dans ce travail n'est pas propre au SPEDE du Québec. Nous avons simplement cherché à attribuer un plafond d'émission à la compagnie assujettie tout en lui imposant d'acheter des quotas supplémentaires en cas de dépassement et en lui permettant de réaliser des profits additionnels grâce à la revente de quotas excédentaires. Le but de ce travail n'est pas de modéliser la nature exacte du SPEDE québécois mais plutôt d'encourager les entreprises à s'habituer dès maintenant à prendre en considération les émissions de carbone dans leurs processus d'aide à la décision.

## 4.2 Structure de la chaîne d'approvisionnement étudiée

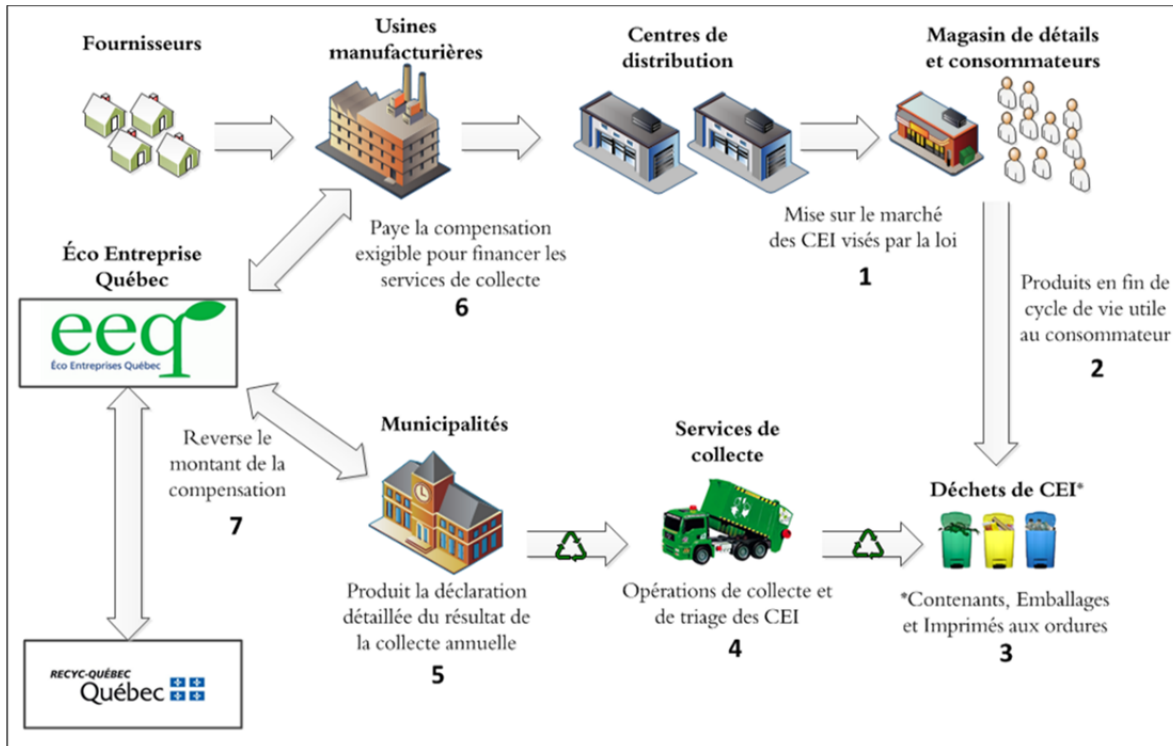


Figure 4.1. Principe de fonctionnement de la loi québécoise sur la compensation

### Construction du modèle mathématique d'aide à la décision

Dans ce cas d'étude, nous supposons que l'entreprise concernée est soumise à la loi sur la compensation et aux restrictions d'émissions de GES au Québec. Ainsi, la structure de notre formulation mathématique comprend premièrement un ensemble de fournisseurs, chez qui l'on s'approvisionne en matières premières, précisément celles visées par la législation. La fabrication des CEI mis sur le marché par la compagnie a lieu dans des usines manufacturières au moyen de plusieurs technologies (standard versus verte). Nous considérons une chaîne d'approvisionnement de taille assez importante pour approvisionner 25 magasins de détails répartis dans la province. Ainsi, nous posons l'hypothèse qu'un ensemble de centres de distribution est nécessaire pour couvrir l'ensemble de la zone de marché de manière efficace. Étant considérée comme premier fournisseur du type de produit mis sur le marché, l'entreprise assujettie est donc légalement responsable de l'ensemble des

émissions des GES engendrées par son activité industrielle, et ce, incluant également les activités d'approvisionnement en matières premières chez les fournisseurs ainsi que les transports requis pour les acheminer aux usines de production.

### Fournisseurs

Quelle que soit la version du produit fini fabriquée, standard ou vert, il s'agit d'un assemblage de cinq (5) composants différents. Comme la loi sur la compensation établit des tarifs en fonction du type de matières premières collectées, nous avons considéré que chaque composant correspond à un type de matière première différente. Ainsi, lorsqu'on fera référence à un « composant », on fait aussi référence à un « type de matériau » spécifique. Nous avons choisi de ne pas mettre les fournisseurs en compétition, ainsi chacun d'entre eux n'est en mesure de fournir qu'un seul type de matière première. Notons que ce travail considère une famille de produit unique dans deux (2) versions différentes, c'est pourquoi la nouvelle version est fabriquée à partir d'un BOM en partie similaire puisqu'il s'agit d'une même famille de produit, mais comportant une majorité de composants éco-conçus.

### Usines de production

Les usines manufacturières assemblent ensuite les composants sur l'une ou l'autre des technologies de production à disposition. Le but de ce travail étant l'optimisation des décisions tactiques et non stratégiques, nous avons choisi de ne pas considérer le coût d'acquisition de la nouvelle technologie pouvant s'avérer très élevé. Nous avons la possibilité d'assembler certains composants avec l'ancienne technologie par une main d'œuvre régulière, ce qui donnera un produit fini dans sa version « standard », ou bien d'assembler un ensemble de composants légèrement différents à l'aide de la nouvelle technologie et ainsi obtenir le produit fini dans sa version dite « verte ». Ceci nécessite cependant une main d'œuvre qualifiée ayant reçu au préalable une formation sur la nouvelle technologie. Notons que les usines ont la possibilité d'acquérir en avance et de stocker des composants. En revanche, les produits finis sont assemblés en « juste à temps ». Nous entendons par là qu'une fois assemblés, ceux-ci ne sont pas stockés aux usines et partent directement en livraison dans les différents centres de distribution.

### Centres de distribution

Il s'agit de plusieurs entrepôts de tailles variées répartis de manière stratégique pour une bonne couverture du réseau logistique. Ces infrastructures servent de lieu de stockage pour les produits finis qui arrivent par camion depuis les usines manufacturières. Ces bâtiments présentent des coûts de stockage qui diffèrent selon les sites et les types de produits stockés. Les coûts relatifs à la manutention dépendent des quantités et poids à prendre en charge à chaque période. Par la suite, des camions viennent y charger les quantités de produits standard versus verts requis pour satisfaire la demande des consommateurs à chaque période.

### Transports

Bien que les véhicules considérés présentent des capacités différentes, le choix du type de véhicule ne fait pas partie des objectifs de ce travail. Ainsi, même si pour plus de réalisme nous avons utilisé dans cette étude plusieurs catégories PTAC, des facteurs d'émissions et des consommations différentes pour les camions, nous avons affecté un type de véhicule particulier à une portion de chaîne d'approvisionnement. C'est-à-dire que les livraisons entre fournisseurs et usines seront effectuées par les véhicules de type 1, les trajets des usines aux centres de distribution se feront par les véhicule de type 2, et les livraisons aux clients utiliseront des véhicules de type 3 (et par « type » nous entendons une catégorie PTAC, des capacités de chargement en termes de poids et de volume, des consommations au kilomètre ainsi que des facteurs d'émissions qui leur sont propres).

### Horizon de planification tactique

Afin de nous rapprocher au plus de la réalité industrielle, nous considérons dans cette étude quatre (4) périodes, chacune d'une durée trimestrielle. De cette manière notre horizon d'étude est d'une (1) année et permet à la fois de correspondre à la loi sur la compensation mais également de comptabiliser les émissions de GES de chaque secteur sur une base trimestrielle de la même manière que dans le cadre du SPEDE québécois. Les données numériques considérées pour les expérimentations sont détaillées dans le chapitre suivant.

### 4.3 Formulation du modèle mathématique

#### 4.3.1 Ensembles et indices

$f \in F$	Indice des fournisseurs
$u \in U$	Indice des usines
$e \in E$	Indice des entrepôts
$c \in C$	Indice des clients
$r \in R$	Indice des matériaux nécessaires à la fabrication des produits
$p \in P$	Indice des produits finis
$t \in T$	Indice des différentes périodes considérées
$m \in M$	Indice des machines de production aux usines

#### 4.3.2 Variables de décisions considérées

$X_{furt}$	= Flux de matériau $r \in R$ entre le fournisseur $f \in F$ et l'usine $u \in U$ à la période $t \in T$ en unités
$X_{uept}$	= Flux de produits $p \in P$ entre l'usine $u \in U$ et l'entrepôt $e \in E$ à la période $t \in T$ en unités
$X_{ecpt}$	= Flux de produits $p \in P$ entre le centre l'entrepôt $e \in E$ et le client $c \in C$ à la période $t \in T$ en unités
$S_{rut}$	= Quantité de matériau $r \in R$ conservé en stock à l'usine $u \in U$ durant la période $t \in T$ en unités
$S_{pet}$	= Quantité de produit $p \in P$ conservé en stock à l'entrepôt $e \in E$ durant la période $t \in T$ en unités
$Q_{pumt}$	= Quantité de produit $p \in P$ issu de la production sur la machine $m \in M$ à l'usine $u \in U$ pendant la période $t \in T$ en unités
$Y_{umt}$	= Nombre d'employés qualifiés pour travailler à l'usine $u \in U$ sur la machine $m \in M$ requis à la période $t \in T$

### 4.3.3 Paramètres logistiques

- $b_{rp}$  = Quantité du matériau  $r \in R$  présent dans le produit  $p \in P$   
 $q_{rt}$  = Quantité du matériau  $r \in R$  mis sur le marché à la période  $t \in T$  en kg  
 $z_{rt}$  = Tarifs pour un kg du matériau  $r \in R$  mis sur le marché à la période  $t \in T$   
 $p_r$  = Poids du matériau  $r \in R$  en kg  
 $p_p$  = Poids du produit  $p \in P$  en kg  
 $v_r$  = Volume occupé par le matériau  $r \in R$  en  $m^3$   
 $v_p$  = Volume occupé par le produit  $p \in P$  en  $m^3$   
 $a_{pm}$  = Temps nécessaire pour fabriquer le produit  $p \in P$  sur la machine  $m \in M$  en h  
 $\Phi_{pct}$  = Demande du produit  $p \in P$  par le client  $c \in C$  à la période  $t \in T$   
 $k_{ftrt}$  = Capacité maximale du fournisseur  $f \in F$  à fournir le matériau  $r \in R$   
à la période  $t \in T$   
 $s_{ut}$  = Capacité de stockage de l'usine  $u \in U$  à la période  $t \in T$  en kg  
 $s_{et}$  = Capacité de stockage de l'entrepôt  $e \in E$  à la période  $t \in T$  en kg  
 $h_{rut}$  = Coût de possession du matériau  $r \in R$  à l'usine  $u \in U$  durant la période  $t \in T$   
 $h_{pet}$  = Coût de possession du produit  $p \in P$  à l'entrepôt  $e \in E$  durant la période  $t \in T$   
 $v^{fu}$  = Capacité volumique des camions entre fournisseurs et usines en  $m^3$   
 $v^{ue}$  = Capacité volumique des camions entre usines et entrepôts en  $m^3$   
 $v^{ec}$  = Capacité volumique des camions entre les entrepôts et les clients en  $m^3$   
 $w^{fu}$  = Capacité des camions entre les fournisseurs et les usines en kg  
 $w^{ue}$  = Capacité des camions entre les usines et les entrepôts en kg  
 $w^{ec}$  = Capacité des camions entre les entrepôts et les clients en kg  
 $n_{fu}$  = Nombre de camions disponibles pour livrer les composants entre les  
fournisseurs  $f \in F$  et les usines  $u \in U$   
 $n_{ue}$  = Nombre de camions disponibles pour livrer les produits entre les  
usines  $u \in U$  et les entrepôts  $e \in E$   
 $n_{ec}$  = Nombre de camions disponibles pour livrer les produits entre les  
entrepôts  $e \in E$  et les clients  $c \in C$

$c_r$  = Coût unitaire de transport du matériau  $r \in R$  en \$/km

$c_p$  = Coût unitaire de transport du produit  $p \in P$  en \$/km

$d_{fu}$  = Distance du fournisseur  $f \in F$  à l'usine  $u \in U$  en km

$d_{ue}$  = Distance de l'usine  $u \in U$  à l'entrepôt  $e \in E$  en km

$d_{ec}$  = Distance de l'entrepôt  $e \in E$  au client  $c \in C$  en km

On considère ici que la compagnie a accès à différents types de camions pour effectuer ses livraisons. Le type de camion varie selon la portion de route considérée (i.e. Fournisseurs – Usines, Usines-Entrepôts ou bien Entrepôts-Clients). Cependant la capacité des camions ne fait pas partie des variables de décisions car ceci n'est pas l'objet de ce travail de recherche.

Les distances entre les sites ont été calculées à l'aide de la formule suivante :

$$d = 2R \sin \left( \min \left( 1, \sqrt{((\sin(dlat/2))^2 + \cos(lat1) * \cos(lat2)(\sin(dlon/2))^2)} \right) \right)$$

Avec  $R = 6370$  km pour le rayon de la terre.  $X$  ( $lon1$ ,  $lat1$ ) et  $Y$  ( $lon2$ ,  $lat2$ ) sont les coordonnées des deux sites en radians et  $dlat = lat2 - lat1$ ,  $dlon = lon2 - lon1$ .

#### Acquisition, production, manutention, maintenance et main d'œuvre

$acq_{rft}$  = Coût d'achat du matériau  $r \in R$  chez le fournisseur  $f \in F$  à la période  $t \in T$

$prod_{put}$  = Coût de production du produit  $p \in P$  à l'usine  $u \in U$  à la période  $t \in T$

$man_{pet}$  = Coût de manutention du produit  $p \in P$  à l'entrepôt  $e \in E$  à la période  $t \in T$

$m_{mut}$  = Coût d'une opération de maintenance sur la technologie  $m \in M$  à l'usine  $u \in U$  pendant la période  $t \in T$

$pen_{mut}$  = Pénalité financière encourue par l'arrêt de la production pour la maintenance de la technologie  $m \in M$  à l'usine  $u \in U$  pendant la période  $t \in T$

$l_{mut}$  = Limite de produits fabriqués après quoi une opération de maintenance est requise sur la technologie  $m \in M$  à l'usine  $u \in U$  pendant la période  $t \in T$  en unité

$f_m$  = Coût supplémentaire engendré par la formation d'un ouvrier à travailler sur la nouvelle technologie  $m \in M$  en \$ par employé

$g$  = Capacité de travail d'un ouvrier sur une période en heures

$o_m$  = Coût horaire d'un ouvrier capable de travaillé sur la technologie  $m \in M$

Le coût d'acquisition correspond au prix unitaire à payer pour l'achat d'un composant chez le fournisseur approprié. Le coût de production est lié à l'assemblage des composants sur les deux (2) lignes de production (i.e. technologie standard versus verte). Quant à la manutention, il s'agit des coûts engendrés par les opérations aux entrepôts visant à décharger, stocker et charger les camions pour les différentes livraisons. On retrouve ensuite les opérations de maintenance ayant lieu sur chacune des deux (2) technologies de production. Chacune des deux technologies possède son propre seuil de tolérance quant au nombre d'unités maximal de produits finis pouvant être assemblés avant qu'une opération de maintenance ne soit exigée. Enfin, on présente aussi les paramètres en rapport avec les ouvriers réguliers versus qualifiés ainsi que le coût de formation requis permettant à un employé de travailler sur la nouvelle technologie de production.

#### 4.3.4 Paramètres liés aux GES

##### Acquisition, production et manutention

$\pi_{rf}$  = Emprunte carbone initiale du matériau  $r \in R$  acheté chez le fournisseur  $f \in F$

$\varphi_u$  = Facteur d'émission fixe lié à l'utilisation annuelle de l'usine  $u \in U$

$\beta_p$  = Facteur d'émission pour la production du produit  $p \in P$

$\mu_e$  = Facteur d'émission fixe lié à l'utilisation annuelle de l'entrepôt  $e \in E$

##### Facteurs d'émissions des transports en fonction de la charge

$\varepsilon_{fu}^{vv}$  = Emission au km d'un véhicule à vide entre le fournisseur  $f \in F$  et l'usine  $u \in U$

$\varepsilon_{ue}^{vv}$  = Emission au km d'un véhicule à vide entre l'usine  $u \in U$  et l'entrepôt  $e \in E$

$\varepsilon_{ec}^{vv}$  = Emission au km d'un véhicule à vide entre l'entrepôt  $e \in E$  et le client  $c \in C$

$\varepsilon_{fu}^{vpc}$  = Emission au km d'un véhicule pleine charge entre le fournisseur  $f \in F$  et l'usine  $u \in U$

$\varepsilon_{ue}^{vpc}$  = Emission au km d'un véhicule pleine charge entre l'usine  $u \in U$  et l'entrepôt  $e \in E$

$\varepsilon_{ec}^{vpc}$  = Emission au km d'un véhicule pleine charge entre l'entrepôt  $e \in E$  et le client  $c \in C$



### En fonction de la distance

$\alpha_{fut}$  = Facteur d'émission au km pour l'ensemble du chargement d'un camion entre le fournisseur  $f \in F$  et l'usine  $u \in U$  à la période  $t \in T$

$\alpha_{uet}$  = Facteur d'émission au km pour l'ensemble du chargement d'un camion entre l'usine  $u \in U$  et l'entrepôt  $e \in E$  à la période  $t \in T$

$\alpha_{ect}$  = Facteur d'émission au km pour l'ensemble du chargement d'un camion entre l'entrepôt  $e \in E$  et le client  $c \in C$  à la période  $t \in T$

### Formules d'obtention des facteurs d'émissions des véhicules

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{fut} = \varepsilon_{fu}^{vv} + [ (\varepsilon_{fu}^{vpc} - \varepsilon_{fu}^{vv}) ( \frac{p_r X_{furt}}{w_{fu}} ) ] \quad \text{pour des composants} \quad (4.1) \\ \alpha_{uet} = \varepsilon_{ue}^{vv} + [ (\varepsilon_{ue}^{vpc} - \varepsilon_{ue}^{vv}) ( \frac{p_p X_{uept}}{w_{ue}} ) ] \quad (4.2) \\ \text{Et} \quad \alpha_{ect} = \varepsilon_{ec}^{vv} + [ (\varepsilon_{ec}^{vpc} - \varepsilon_{ec}^{vv}) ( \frac{p_p X_{ecpt}}{w_{ec}} ) ] \quad \text{pour des produits} \quad (4.3) \end{array} \right.$$

$EM_t^+$  = Besoins supplémentaires en droit d'émissions à la période  $t \in T$  en tCO<sub>2</sub>e

$EM_t^-$  = Droits d'émissions pouvant être revendus au terme de la période  $t \in T$  en tCO<sub>2</sub>e

$B_t^+$  = Bilan financier négatif des achats supplémentaires de droits d'émissions à la période  $t \in T$

$B_t^-$  = Bilan financier positif des reventes de droits d'émissions à la période  $t \in T$

$B^{tot}$  = Bilan financier carbone global sur tout l'horizon

$\psi_t$  = Droit d'émission global alloué par le gouvernement à la période  $t \in T$  en tCO<sub>2</sub>e

$\theta_t$  = Prix d'achat ou de revente d'une tonne métrique de carbone équivalent à la période  $t \in T$

Notons que nous avons choisi de ne pas considérer les coûts fixes concernant l'utilisation des infrastructures logistiques de la chaîne d'approvisionnement, à savoir location des entrepôts, équipements, chauffage, électricité et autres. En effet, ce modèle n'étant pas pertinent pour la prise de décision stratégique, nous avons préféré ne pas tenir compte de ces paramètres, n'apportant rien de plus à notre raisonnement. En revanche, pour plus de réalisme, nous

choisissons ici de tenir compte des émissions de GES engendrés par l'utilisation annuelle des infrastructures logistiques, selon le niveau d'utilisation de chacune.

Nous soulignons l'importance de deux (2) paramètres en particulier, à savoir  $\pi_{rf}$  et  $\beta_p$  qui sont les facteurs d'émissions directement liés aux décisions tactiques d'approvisionnement et de production. En effet les matériaux éco conçus présentent une empreinte carbone existante  $\pi_{rf}$  moins élevée que les matériaux classiques. Aussi, le niveau d'émission  $\beta_p$  de la nouvelle technologie est inférieur à celui de l'ancienne. Ainsi, ces deux (2) paramètres jouent en faveur d'un approvisionnement et d'une production plus verte. Enfin, nous avons choisi à la fois par soucis de réalisme et de précision de prendre en considération le niveau de charge des véhicules afin de comptabiliser les émissions des transports, secteur qui représente statistiquement généralement plus de 40 % des émissions de la chaîne logistique à lui seul.

#### 4.3.5 Synthèse des coûts logistiques

Coût d'acquisition des matériaux chez les fournisseurs

$$\sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} acq_{rft} X_{furt} \quad (4.4)$$

Coût de transport des matériaux des fournisseurs aux usines

$$\sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \frac{p_r c_r d_{fu}}{w^{fu}} X_{furt} \quad (4.5)$$

Coût de production aux usines manufacturières

$$\sum_{p \in P} \sum_{u \in U} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} prod_{put} Q_{pumt} \quad (4.6)$$

Coût de la maintenance sur les machines de production

$$\sum_{p \in P} \sum_{u \in U} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} \frac{Q_{pumt} (m_{mut} + pen_{mut})}{l_{mut}} \quad (4.7)$$

Nombre d'ouvriers requis pour la production sur chaque machine

$$Y_{umt} = \sum_{p \in P} \frac{a_{pm} Q_{pmut}}{g} \quad \forall u \in U, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (4.8)$$

Coût total de la main d'œuvre requise

$$\sum_{u \in U} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} Y_{umt} o_m g \quad (4.9)$$

Coût de la formation des employés sur chaque nouvelle machine

$$\sum_{u \in U} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} Y_{umt} f_m \quad (4.10)$$

Coût de stockage des matériaux aux usines

$$\sum_{r \in R} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} S_{rut} \cdot h_{rut} \quad (4.11)$$

Coût de transport des produits finis aux entrepôts

$$\sum_{u \in U} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \frac{p_p c_p d_{ue}}{w^{ue}} X_{uept} \quad (4.12)$$

Coût de manutention aux entrepôts

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} man_{pet} X_{ecpt} \quad (4.13)$$

Coût de stockage des produits finis aux entrepôts

$$\sum_{p \in P} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} S_{pet} \cdot h_{pet} \quad (4.14)$$

Coût de transport des produits finis jusqu'aux zones clients

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \frac{p_p c_p d_{ec}}{w^{ec}} X_{ecpt} \quad (4.15)$$

### 4.3.6 Compensation

Poids des différents types de matériaux mis sur le marché à chaque période

$$q_{rt} = \sum_{f \in F} \sum_{u \in U} p_r X_{furt} \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4.16)$$

Compensation annuelle à verser pour la compensation aux services de collectes

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} z_{rt} q_{rt} \quad (4.17)$$

### 4.3.7 Synthèse des émissions de CO<sub>2</sub>

Emission de CO<sub>2</sub> des transports entre fournisseurs et usines

$$\sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \alpha_{fut} d_{fu} \quad (4.18)$$

Emission de CO<sub>2</sub> des transports entre usines et entrepôts

$$\sum_{u \in U} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} \alpha_{uet} d_{ue} \quad (4.19)$$

Emission de CO<sub>2</sub> des transports entre entrepôts et zones clients

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \alpha_{ect} d_{ec} \quad (4.20)$$

Impact carbone à l'acquisition des matériaux chez les fournisseurs

$$\sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \pi_{rf} X_{furt} \quad (4.21)$$

Emissions de CO<sub>2</sub> liée à la consommation des bâtiments industriels (usines)

$$\sum_{u \in U} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \varphi_u \frac{p_p X_{uept}}{s_{ut}} \quad (4.22)$$

Impact carbone de la production aux usines

$$\sum_{u \in U} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \beta_p X_{uept} \quad (4.23)$$

Emissions de CO<sub>2</sub> liée à la consommation des entrepôts

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \mu_e \frac{p_p X_{ecpt}}{s_{et}} \quad (4.24)$$

Les expressions (4.18) à (4.24) permettent de définir les quantités d'émissions impliquées dans chaque secteur ou activité mentionnés. Ainsi, durant une période de temps, il suffit d'additionner ces différentes quantités afin d'obtenir le niveau d'émission total de la chaîne d'approvisionnement. Le bilan permet selon les quotas alloués à l'entreprise et le prix de vente d'une unité supplémentaire de déterminer si la compagnie réalise un profit ou bien si elle encoure des coûts supplémentaires. Ainsi, selon le niveau d'approvisionnement et de production standard versus verts, l'entreprise fait face à des pénalités financières plus ou moins conséquentes comme pour la compensation.

Besoins supplémentaires en droit d'émissions à la période t

$$EM_t^+ = \text{Max} [(EM_t - \psi_t); 0] \quad (4.25)$$

Droits d'émissions pouvant être revendus au terme de la période t

$$EM_t^- = \text{Max} [(\psi_t - EM_t); 0] \quad (4.26)$$

Bilan financier négatif des achats supplémentaires de droits d'émissions à la période t

$$B_t^- = EM_t^+ \theta_t \quad (4.27)$$

Bilan financier positif des reventes de droits d'émissions à la période t

$$B_t^+ = EM_t^- \theta_t \quad (4.28)$$

Bilan financier carbone global sur tout l'horizon

$$B^{tot} = \sum_{t \in T} B_t^+ - \sum_{t \in T} B_t^- = \sum_{t \in T} (EM_t^- - EM_t^+) \cdot \theta_t \quad (4.29)$$

Les expressions (4.25) et (4.26) n'étant pas linéaires, elles sont présentées ici à titre indicatif pour aider le lecteur dans sa compréhension du calcul du bilan carbone de la chaîne d'approvisionnement. En pratique, le calcul a été réalisé dans Excel plutôt que dans le solveur afin d'éviter une formulation mathématique non linéaire plus complexe à résoudre.

#### 4.3.8 Fonction objectif

Emissions totales à la période t

$$EM_t = (4.18) + (4.19) + (4.20) + (4.21) + (4.22) + (4.23) + (4.24) \quad (4.30)$$

Coût logistique total à la période t

$$LO_t = (4.4) + (4.5) + (4.6) + (4.7) + (4.9) + (4.10) + (4.11) + (4.12) \\ + (4.13) + (4.14) + (4.15) \quad (4.31)$$

Fonction objectif globale de minimisation des coûts

$$\text{Min FO} = (4.4) + (4.5) + (4.6) + (4.7) + (4.9) + (4.10) + (4.11) + (4.12) + \\ (4.13) + (4.14) + (4.15) + (4.17) - (4.29) \quad (4.32)$$

#### 4.3.9 Définition des contraintes

Satisfaction de la demande des magasins

$$\sum_{e \in E} \sum_{p \in P} X_{ecpt} = \sum_{p \in P} \Phi_{pct} \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (4.33)$$

Flux de composants entre fournisseurs et usines

$$\sum_{f \in F} X_{furl} + S_{ur(t-1)} = \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} X_{uept} b_{rp} + S_{urt} \quad \forall u \in U, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4.34)$$

Flux de produits entre usines et centres de distribution

$$\sum_{u \in U} X_{uept} + S_{pe(t-1)} = \sum_{c \in C} X_{ecpt} + S_{pet} \quad \forall e \in E, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.35)$$

Pas de stocks de produits finis aux usines : production JIT

$$\sum_{m \in M} Q_{pumt} = \sum_{e \in E} X_{uept} \quad \forall p \in P, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (4.36)$$

Capacité des fournisseurs en nombre de composants

$$\sum_{u \in U} X_{furl} \leq k_{frt} \quad \forall f \in F, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4.37)$$

Capacité des usines en kg

$$\sum_{f \in F} \sum_{r \in R} p_r (X_{furl} + S_{urt}) + \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} p_p X_{uept} \leq s_{ut} \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (4.38)$$

Capacité des centres de distribution en kg

$$\sum_{u \in U} \sum_{p \in P} p_p X_{uept} + \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} p_p (X_{ecpt} + S_{pet}) \leq s_{et} \quad \forall e \in E, \forall t \in T \quad (4.39)$$

Une technologie assemble un unique type de produit : standard ou vert

$$Q_{pumt} = 0 \quad \forall p \neq m, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (4.40)$$

Capacités des véhicules de livraisons en poids et volumes

$$\sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} p_r X_{furl} \leq n_{fu} w^{fu} \quad \forall t \in T \quad (4.41)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} p_p X_{uept} \leq n_{ue} w^{ue} \quad \forall t \in T \quad (4.42)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} p_p X_{ecpt} \leq n_{ec} w^{ec} \quad \forall t \in T \quad (4.43)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{u \in U} \sum_{r \in R} v_r X_{furt} \leq n_{fu} v^{fu} \quad \forall t \in T \quad (4.44)$$

$$\sum_{u \in U} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} v_p X_{uept} \leq n_{ue} v^{ue} \quad \forall t \in T \quad (4.45)$$

$$\sum_{e \in E} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} v_p X_{ecpt} \leq n_{ec} v^{ec} \quad \forall t \in T \quad (4.46)$$

$$X_{furt} \geq 0, \quad \forall f \in F, \forall u \in U, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4.47)$$

$$X_{uept} \geq 0, \quad \forall u \in U, \forall e \in E, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.48)$$

$$X_{ecpt} \geq 0, \quad \forall e \in E, \forall c \in C, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.49)$$

$$S_{urt} \geq 0, \quad \forall u \in U, \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4.50)$$

$$S_{ept} \geq 0, \quad \forall e \in E, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (4.51)$$

$$Q_{pumt} \geq 0, \quad \forall p \in P, \forall u \in U, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (4.52)$$

$$Y_{umt} \geq 0, \quad \forall u \in U, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (4.53)$$

La contrainte (4.33) s'assure que la demande des clients est satisfaite à 100 %. Les contraintes (4.34) et (4.35) imposent que les flux entrants ajoutés aux stocks de la période précédente soient égaux aux flux sortants ajoutés aux stocks de la période actuelle. La contrainte (4.36) représente le fait que l'on ne conserve pas de produits finis en stock aux usines, ainsi chaque produit fabriqué part immédiatement pour un entrepôt. La contrainte (4.37) limite les quantités de composants disponibles chez les fournisseurs. Les contraintes (4.38) et (4.39) limitent les capacités d'accueil des usines et des centres de distribution en considérant les flux entrants et sortants. La contrainte (4.40) impose qu'une technologie de production ne prend en charge qu'un seul type de produit. Les contraintes (4.41) à (4.46) définissent les capacités des véhicules de livraison. Ces dernières limitent également le nombre de véhicules disponibles dans la flotte. Enfin les contraintes (4.47) à (4.53) imposent que les variables de décisions relatives aux flux et aux stocks soient entières et positives.



#### **4.4 Conclusion**

Dans cette section, nous avons présenté la structure de la chaîne d'approvisionnement. Le produit alternatif composé de matériaux éco-conçus va permettre à l'entreprise de réduire le poids total des produits finis mis sur le marché pour les consommateurs ainsi que le niveau d'émissions de GES. L'éco-conception des matériaux et l'utilisation d'une nouvelle technologie présentent cependant certains coûts additionnels. Cette alternative donne le choix à l'entreprise de revoir et d'adapter son plan d'approvisionnement et de production sur l'année afin de gérer au mieux les frais de compensation et les droits d'émissions qui lui sont alloués pour cette période. Ainsi, les expérimentations conduites au chapitre 5 vont servir à déterminer dans quelle mesure il est profitable pour l'entreprise d'utiliser cette solution alternative. Dans un premier temps, le chapitre suivant présente plus en détails les données utilisées pour réaliser les expérimentations. Le lecteur y trouvera des informations utiles aussi bien au sujet de la chaîne d'approvisionnement étudiée que sur les paramètres environnementaux associées à la compensation et aux émissions de gaz à effet de serre.



## CHAPITRE 5

### STRUCTURE DES DONNÉES

#### 5.1 Introduction

Cette section présente les principales données utilisées lors des expérimentations. De cette manière, le lecteur aura une meilleure idée du type de chaîne d'approvisionnement étudiée. Des précisions sont également apportées quant aux valeurs réelles des paramètres environnementaux, ce qui permet de mieux réaliser le niveau d'exigence actuel de telles réglementations. Avant de terminer la lecture de cette section et de passer aux résultats des expérimentations, nous souhaitons éclaircir quelques points quant à l'exemple de chaîne d'approvisionnement choisi dans cette étude ainsi qu'aux valeurs attribuées à son impact environnemental. Aujourd'hui, de nombreuses compagnies Québécoises de petite taille ou exerçant une activité dans un secteur non visé par la loi ne sont évidemment que très peu touchées par ces deux (2) réglementations. En effet, certaines d'entre elles ne sont tout simplement pas assujetties quand d'autres peuvent être très peu impliquées et recevoir une facture annuelle environnementale inférieure à 10 000 \$, représentant ainsi un montant dérisoire pour le type de compagnie considérée dans notre exemple et dont les coûts logistiques annuels s'élèvent à plusieurs millions de dollars. Dans le cadre de la loi sur la compensation par exemple, les entreprises déclarant annuellement des quantités de CEI comprises entre 0 et 15 tonnes sont redevables à hauteur de 2 560 \$ par année au maximum. De la même manière dans le cadre du SPEDE et des limitations d'émissions de GES, nous rappelons comme précisé dans le premier chapitre que les entreprises émettant moins de 25 000 tonnes d'équivalent carbone par an ne sont pas concernées. Intuitivement, on se doute qu'un cas d'étude sur une chaîne d'approvisionnement dont les émissions sont proches du seuil des 25KtCO<sub>2</sub>e (i.e. comprises entre 25 KtCO<sub>2</sub>e et 50KtCO<sub>2</sub>e) ne serait que d'un intérêt réduit. Rappelons que l'intérêt de la modélisation mathématique linéaire présentée dans le chapitre 3 est d'apporter un éventuel soutien aux entreprises qui pourraient avoir besoin de support dans leur processus d'aide à la décision et de réduction de la facture environnementale annuelle. Ainsi, nous avons trouvé d'un meilleur intérêt d'étudier un

exemple de chaîne d’approvisionnement avec un impact environnemental initial conséquent. C’est pourquoi nous supposons que l’entreprise assujettie met sur le marché une quantité de 500 tonnes de CEI annuellement, et que son niveau d’émissions de GES est de l’ordre des 250 KtCO<sub>2</sub> d’équivalent carbone annuel. Nous souhaitons souligner le fait que si pour une petite entreprise le chiffre de 250 KtCO<sub>2</sub>e annuel peut paraître excessif, rappelons que les 500 entreprises les plus polluantes au monde ont un bilan annuel moyen de 8 000 000 de tonnes émises soit environ 32 fois supérieur à l’entreprise considérée dans notre cas (Avec notamment un résultat de plus de 50 millions de tonnes pour le premier du classement). En 2012, avant la mise en place du SPEDE et l’obligation de divulgation, plusieurs dizaines de compagnies locales ont été interrogées sur leurs niveaux d’émissions de GES. Ce n’est pas un hasard si plus d’un tiers (35 %) d’entre elles ont refusé catégoriquement de divulguer leurs chiffres.

## **5.2 Données propres à la chaîne logistique**

### **5.2.1 Approvisionnement**

Comme expliqué en section 3.2, l’achat de matières premières (i.e. matériaux ou aussi composants)  $r = \{r_1 \dots r_n\}$  a lieu chez un ensemble de fournisseurs  $f = \{f_1 \dots f_n\}$ . Le choix a été fait de ne pas mettre les fournisseurs en concurrence et donc un ensemble de huit (8) fournisseurs permettent l’approvisionnement de huit (8) matières premières différentes, soit une par fournisseur. L’ensemble  $\{X_1 \dots X_8\}$  représente les différentes capacités des fournisseurs en unités de chaque composant.

Tableau 5.1. Non-compétitivité entre les fournisseurs de matières premières

Fournisseurs	composant 1	composant 2	composant 3	composant 4	composant 5	composant 6	composant 7	composant 8
F1					X5			
F2								X8
F3	X1							
F4		X2						
F5			X3					
F6				X4				
F7								
F8								
F9						X6		
F10							X7	

Ce qui est plus important en revanche, ce sont les types de matériaux considérés. Afin d'avoir une plus grande variété de tarifs nous avons choisi de considérer que les matériaux  $\{r_1...r_5\}$  sont tous différents. Les matériaux  $\{r_6...r_8\}$  sont les mêmes que  $\{r_3...r_5\}$  mais dans leurs versions éco-conçues.

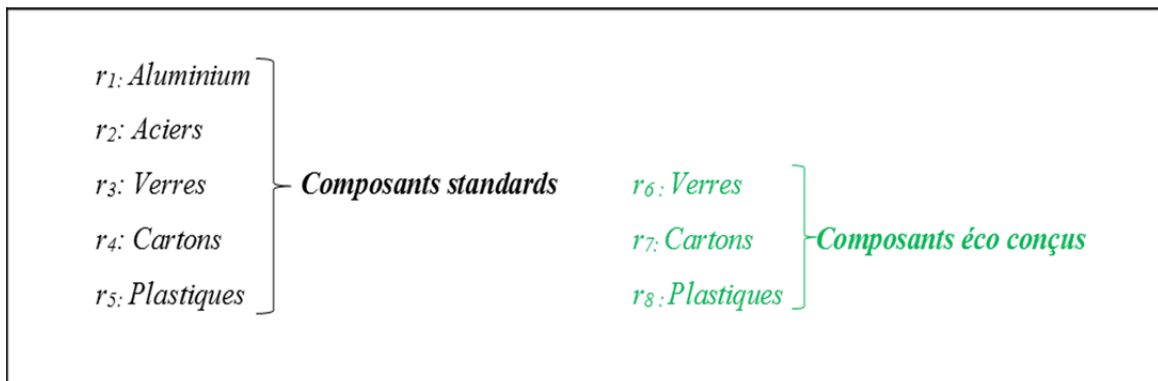


Figure 5.1. Composants standards versus composants verts

L'éco-conception (EC\*) des composants  $\{r_6...r_8\}$  implique une hausse de leur prix d'achat unitaire chez le fournisseur concerné. Les diverses expériences menées dans le chapitre suivant nous amèneront à analyser l'impact de la variation du coût unitaire d'achat des composants verts. Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur des coûts impliqués, avec ici le cas où l'éco-conception accroît de 20 % le coût unitaire d'un composant vert.

Tableau 5.2. Coût d'achat unitaire (en \$) des composants standard versus composants verts  
(Ex. hausse de 20 %)

Fournisseurs	composant 1	composant 2	composant 3	composant 4	composant 5	composant 6	composant 7	composant 8
F1	0	0	0	0	1	0	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0	1,2
F3	0,9	0	0	0	0	0	0	0
F4	0	0,7	0	0	0	0	0	0
F5	0	0	0,75	0	0	0	0	0
F6	0	0	0	0,5	0	0	0	0
F7	0	0	0	0	0	0	0	0
F8	0	0	0	0	0	0	0	0
F9	0	0	0	0	0	0,9	0	0
F10	0	0	0	0	0	0	0,6	0

### 5.2.2 Production

L'assemblage des différents composants  $\{r_1...r_8\}$  s'effectue au sein de quatre usines manufacturières  $\{u_1...u_4\}$  de tailles et de capacités d'accueil variées. Les composants peuvent être assemblés en deux (2) versions du produit fini  $\{p_{standard}, p_{vert}\}$  selon des BOM différents :

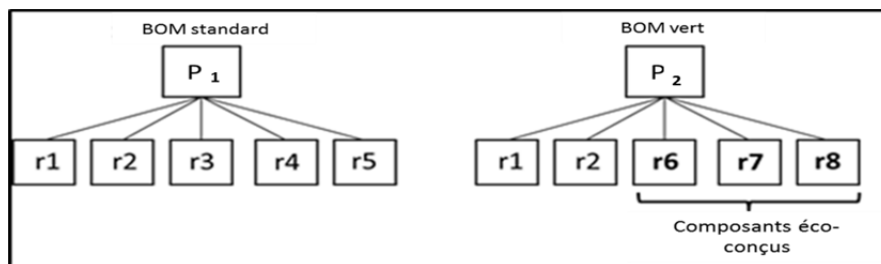


Figure 5.2. BOM standard versus BOM vert

Cependant, l'assemblage des composants verts  $\{r_6...r_8\}$  implique l'utilisation d'une nouvelle technologie dite « verte ». L'acquisition de cette technologie a été réalisée dans le but de fournir cette alternative permettant ainsi d'assembler les nouveaux composants en une version différente du produit fini initial. Le principal atout de la technologie verte étant son

niveau d'émissions de GES inférieur à l'ancienne technologie, les détails seront présentés dans la section dédiée aux émissions de CO<sub>2</sub>. Aussi, on suppose que l'utilisation de la nouvelle technologie requiert des compétences spécifiques. Ainsi, les employés (i.e. ouvriers) devront suivre une formation afin d'être en mesure d'assembler le BOM vert sur la nouvelle technologie. On suppose que l'entreprise encoure un coût supplémentaire de 500 \$ pour chaque ouvrier formé sur la nouvelle technologie. De même, on suppose qu'un ouvrier ayant effectué la formation et travaillant sur la nouvelle technologie voit sa rémunération augmenter de 13,5 \$/heure à 17 \$/heure. Enfin, on considère qu'après une certaine quantité de produits assemblés, les deux technologies nécessitent des opérations de maintenance afin de ne pas compromettre la qualité des produits finis. La technologie verte étant neuve et plus performante, nous avons choisi de fixer la limite de production à 20 000 unités contre seulement 8 000 pour l'ancienne technologie, plus usée. Le tableau suivant récapitule les caractéristiques des ouvriers. La capacité horaire de travail est basée sur une cadence de travail de 8 h/jour x 5 jours/semaine x 4 semaines/mois x 3 mois/période = 480 heures par période de temps.

Tableau 5.3. Paramètres relatifs aux ouvriers travaillant aux usines manufacturières

OUVRIERS					
Coût de formation sur la nouvelle technologie		Capacité de travail d'un ouvrier sur une période		Coût horaire d'un ouvrier travaillant sur l'ancienne et sur la nouvelle technologie respectivement	
500	\$/ ouvrier	480	h / ouvrier	13,5 \$/h	17 \$/h

### 5.2.3 Stockage

Les composants peuvent au besoin être stockés aux usines avant d'être assemblés. Les produits finis quant à eux sont entreposés dans des entrepôts  $\{e_1 \dots e_8\}$  avant d'être distribués aux consommateurs finaux. À titre indicatif, les centres de distribution ont des capacités de stockage allant de 40 000 kg pour le plus petit, et pouvant atteindre 88 000 kg pour le plus large. Quant aux usines manufacturières, elles peuvent contenir 65 000 kg de marchandises pour la plus petite jusqu' à 110 000 kg pour la plus spacieuse. Lorsqu'un composant ou un

produit fini est maintenu en stock dans une usine ou un centre de distribution, des coûts de possession s'appliquent. On a choisi un tarif de 0.050 \$ par composant stocké dans une usine et de 0.1 \$ par produit fini stocké dans un centre de distribution (tarifs pouvant être amenés à changer selon la période considérée).

Tableau 5.4. Capacités d'accueil et coûts de possession des infrastructures logistiques

Bâtiments logistiques	Taille Min (milliers de kg)	Taille Max (milliers de kg)	Coûts de possession (\$/unité/période)
Usines	65	110	0,05
Centres de distribution	40	88	0,1

#### 5.2.4 Transports

Notre flotte se compose de deux (2) types de véhicules différents pour les livraisons. Les véhicules de type 1 sont utilisés pour le transport de grosses quantités (transport de composants des fournisseurs aux usines de production ou encore transport de produits finis des usines aux centres de distribution) tandis que les véhicules de type 2 serviront uniquement au transport de plus faibles quantités, c'est-à-dire aux livraisons finales jusqu'aux magasins de détails. Le tableau suivant résume les attributs des deux (2) types de véhicules utilisés :

Tableau 5.5. Caractéristiques principales des véhicules de livraisons

/	Catégorie PTAC	Poids utile en tonnes	Capacité volumique (m <sup>3</sup> )	Coût unitaire (\$/km)
Véhicules Type 1	Catégorie 5,1 à 6 tonnes	2.2	15	12
Véhicules Type 2	Catégorie 3,5 tonnes	1.2	12	16



### 5.2.5 Nature de la demande

On suppose que la demande est répartie parmi 25 magasins de détails qui approvisionnent l'ensemble des consommateurs. Ces derniers ne tiennent pas compte de la différenciation entre la version classique et la version verte de notre produit. En effet, nous rappelons ici que la cible de la loi sur la compensation aux services de collecte se trouve être les contenants, emballages et imprimés accompagnant les produits. Nous avons donc admis l'hypothèse qu'un consommateur qui souhaite se procurer un bien quelconque portera son attention sur ce bien en question plutôt que sur le type d'emballage qui l'accompagne. Ainsi, ce dernier se contentera de CEI standards comme de CEI verts. C'est sur cette hypothèse que se fonde ce travail d'optimisation, car cela laisse le choix à la compagnie de répondre à la demande attendue de ses clients de la meilleure façon possible. Ainsi, l'entreprise peut ajuster ses décisions d'approvisionnement et de production et se réserve la possibilité de fabriquer et de mettre sur le marché plus ou moins de CEI verts versus CEI standard. Le produit fini  $p \in P$  fait l'objet d'une demande annuelle estimée à environ un million d'unités. Les ventes sont réparties sur quatre (4) périodes d'un trimestre comme le montre le tableau 5.3 :

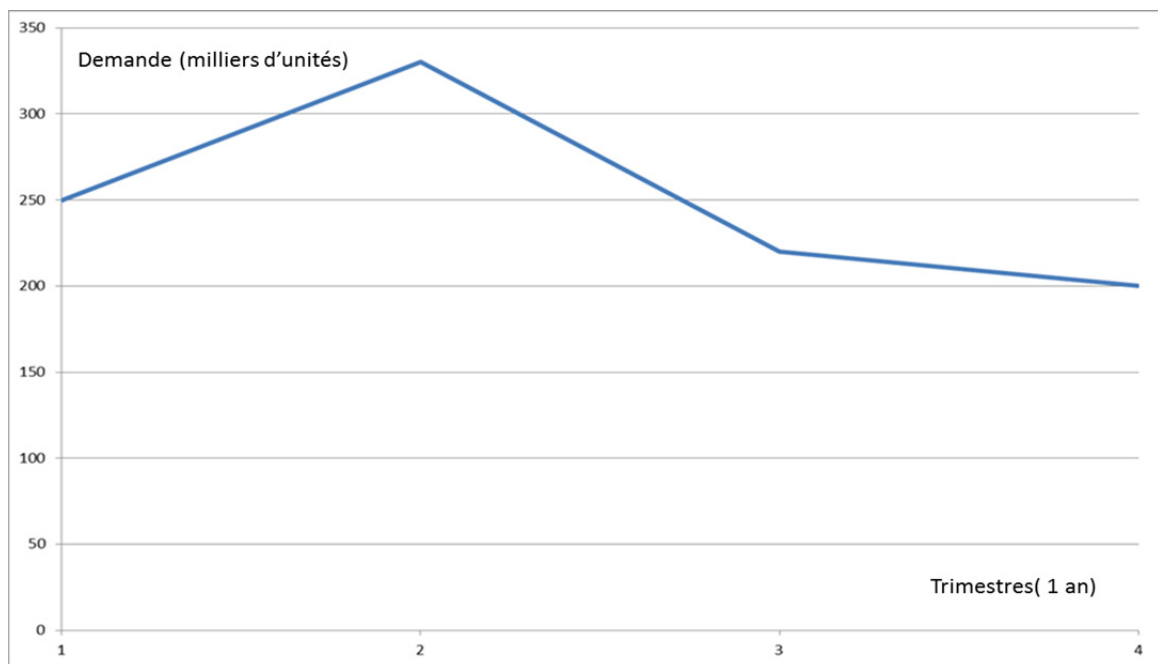


Figure 5.3. Estimation de la demande annuelle pour la famille de produit étudiée

Dans ce cas présent, la nature de la demande est considérée comme déterministe et l'horizon de planification ne dépasse pas une année (quatre (4) périodes d'un trimestre). Le but étant de garder un focus sur l'impact immédiat de la compensation, dont le mécanisme fonctionne sur une base annuelle, ainsi que sur les restrictions d'émissions de GES sur la chaîne d'approvisionnement, dont le mécanisme et les bourses carbone sont trimestriels.

### 5.3 Données relatives à la compensation aux services de collecte

#### 5.3.1 Poids et volumes des produits finis

On suppose donc que l'éco-conception permet une diminution du poids des composants concernés et engendre ainsi une diminution du poids final du produit vert. De plus, on suppose également que ce procédé permet un gain en volume et que s'il est un peu plus léger, le produit vert occupe aussi un volume moins important. Le tableau 5.6 récapitule les données utilisées relativement aux poids/volumes des produits finis :

Tableau 5.6. Poids et volumes du produit standard versus produit vert

Versions	Volume (m <sup>3</sup> )	Poids (kg)
produit standard	0,005	0,5
produit vert	0,0043	0,36

Comme on peut le constater cependant, le gain sur le poids final du produit est plus important au gain obtenu sur le volume. En effet on peut observer un gain au niveau du poids à hauteur de  $100 - ((0.36/0.5) \times 100) = 28 \%$ . Alors que le gain en volume n'est que de  $100 - ((0.0043/0.005) \times 100) = 14 \%$ .

#### 5.3.2 Tarifs applicables

Dans le cadre de la collecte municipale des déchets, les services de collecte récupèrent et trient les différents matériaux dans des centres spécialisés afin de favoriser les opérations de

réutilisation, remise à neuf, recyclage, ou encore d'enfouissement dans certains cas. Comme mentionné au chapitre 2, la loi sur la compensation prévoit que les entreprises assujetties versent un dédommagement aux municipalités. Ainsi, l'organisme ÉEQ réévalue chaque année les tarifs à mettre en vigueur et le tableau suivant reprend des approximations des tarifs réels appliqués, que le lecteur pourra trouver en Annexe I.

Tableau 5.7. Tarifs pour un (1) kg de matière première collecté par les services de collectes

Type de matériaux	Carton	Plastique	Aluminium	Acier	Verre
Tarifs (cents/kg)	26.47	68.13	18.78	9.71	11.49

## 5.4 Données relatives aux émissions de gaz à effet de serre (GES)

### 5.4.1 Choix des facteurs d'émissions

À travers le choix des facteurs d'émissions utilisés lors de nos expérimentations, nous avons tenté de respecter les proportions réelles souvent rencontrées dans l'industrie. Par exemple, de nombreux rapports s'accordent à donner des estimations de l'ordre de 44 % des émissions qui seraient dues au secteur des transports au Québec, dont presque 34 % simplement dans le secteur routier. Ainsi, la structure de notre chaîne d'approvisionnement respecte ces valeurs et le total des émissions du secteur des transports avoisine les 35 % des émissions totales de la chaîne d'approvisionnement. Les facteurs d'émissions des véhicules ont été choisis selon les catégories PTAC et les quantités émises ont été calculées en tenant compte de la charge des camions durant les livraisons. Le tableau 5.8 récapitule les caractéristiques principales des camions utilisés pour acheminer les composants et les produits.

Tableau 5.8. Facteurs d'émissions des véhicules de livraison

/	Consommation aux 100 km (en L)	Catégorie PTAC	Émissions à vide (tCO <sub>2</sub> e/km)	Émissions pleine charge (tCO <sub>2</sub> e/km)
Véhicules Type 1	14,5	Catégorie 5,1 à 6 tonnes	0,107	0,154
Véhicules Type 2	21	Catégorie 3,5 tonnes	0,171	0,211

Nous rappelons que les véhicules de type 1 transportent de plus grosses quantités, à savoir les livraisons de composants aux usines et les livraisons de produits aux entrepôts. En revanche, les véhicules de type 2 sont mieux adaptés à de plus petites quantités et effectuent ainsi uniquement les livraisons jusqu'aux magasins de détails. Concernant les infrastructures logistiques (usines de production et entrepôts de stockage), nous avons adopté le raisonnement suivant : chaque bâtiment possède une capacité d'accueil qui lui est propre (en kg), grâce à laquelle on estime sa surface (en m<sup>2</sup>). Pour une usine de production, on utilise un facteur 100 et pour les entrepôts un facteur 200. Par la suite, la même source nous donne un facteur d'émission de 1000 kg/m<sup>2</sup>/an pour un bâtiment de type « usine manufacturière » et un facteur d'émission de 700 kg/m<sup>2</sup>/an pour un bâtiment de type « entrepôt de stockage ». Ces données nous permettent d'estimer les émissions annuelles de nos usines et entrepôts, sans pour le moment tenir compte des activités plus ou moins intensives selon les flux de produits (répondant à une demande plus ou moins forte des consommateurs). Après cela, le taux d'utilisation des bâtiments est pris en compte afin de considérer également les quantités plus ou moins importantes de produits pris en charge dans nos locaux. Les deux tableaux ci-dessous récapitulent le précédent raisonnement.

Tableau 5.9. Facteurs d'émissions des bâtiments de type « usines manufacturières »

Identifiant	Capacité Maximum (kg)	Surface estimée (en m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> eq (en kg/m <sup>2</sup> /an)	Facteur d'émission des usines (tCO <sub>2</sub> e)
Usine 1	110 000	1 100	1 000	1 100
Usine 2	95 000	950	1 000	950
Usine 3	85 000	850	1 000	850
Usine 4	65 000	650	1 000	650

Tableau 5.10. Facteurs d'émissions des bâtiments de type « entrepôts de stockage »

Identifiant	Capacité Maximum (kg)	Surface estimée (en m <sup>2</sup> )	CO2 eq (kg/m <sup>2</sup> /an)	manutention (tCO <sub>2</sub> eq/an)
Entrepôt 1	65 000	325	700	227.5
Entrepôt 2	60 000	300	700	210
Entrepôt 3	88 000	440	700	308
Entrepôt 4	42 000	210	700	147
Entrepôt 5	50 000	250	700	175
Entrepôt 6	40 000	200	700	140
Entrepôt 7	44 000	220	700	154
Entrepôt 8	66 000	330	700	231

D'autre part, nous avons supposé qu'un produit standard assemblé à partir du BOM standard sur l'ancienne technologie engendre environ 25 % d'émissions supplémentaires par rapport à la production d'un produit vert. En effet, nous avons choisi de considérer que les composants verts présentent un impact carbone initial moindre du fait que l'extraction des matières premières se fait grâce à des méthodes différentes.

#### 5.4.2 Tarifs applicables

Concernant la valeur attribuée à une tonne de carbone équivalent (tCO<sub>2</sub>e), nous avons jugé opportun d'utiliser la valeur réelle à laquelle elle s'est chiffrée lors des enchères de la première période de conformité du SPEDE, à savoir :  $\theta_t = 13.68$  \$. Aussi nous avons supposé que le prix d'achat d'une tCO<sub>2</sub>e était identique au prix de revente de cette dernière dans le cas où l'entreprise est en dessous du seuil imposé par le gouvernement.

#### 5.4.3 Allocation des droits d'émission

Une fois encore, nous nous sommes basés sur des données réelles. Sur les 52 entreprises assujetties pour la première période de conformité, un total de 13 314 871 unités ont été allouées par le gouvernement pour l'ensemble de l'année 2014. Ainsi, nous avons effectué une moyenne des crédits alloués par le gouvernement pour une période d'une année :

$\Omega_t = 13\,314\,871/52 = 256\,055 \text{ tCO}_2\text{e}$ . Les valeurs utilisées tournent donc autour de  $260\,000 / 4 = 65\,000 \text{ tCO}_2\text{e}$  par période. Bien entendu les valeurs utilisées varient selon la taille et le type d'activité de l'entreprise. Nous avons considéré être plutôt dans la moyenne haute et donc nous avons autorisé initialement  $68\,000 \text{ tCO}_2$  d'émission par trimestre.

## 5.5 Conclusion

Même si la quantité trop importante de données nous empêche de tout aborder, après lecture de ce chapitre, le lecteur aura tout de même une meilleure idée des hypothèses formulées par l'auteur dans son travail de recherche. Si certaines données sont fictives, nous avons cependant tenté d'utiliser un maximum de données réelles aujourd'hui en vigueur au Québec, notamment concernant les deux (2) réglementations environnementales étudiées. La tarification applicable par kilogramme de matière première collectée par les services municipaux (en Annexe I), est tirée des chiffres réels exigés par ÉEQ pour l'année 2014 (les tarifs de 2015 étant toujours à l'étude). Les quotas d'émissions alloués ainsi que le prix d'un crédit carbone sur le marché du SPEDE ont eux aussi été tirés de moyennes basées sur des rapports réels.

Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques : < <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/index.asp> >, consulté le 04 Mars 2015.

L'ensemble des facteurs d'émissions a été tiré du document mentionné à la page précédente : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) : < [ea/production\\_energie\\_reseau\\_alimentation/bilan\\_carbone\\_guide\\_facteurs\\_emissionsV5.pdf](http://ea/production_energie_reseau_alimentation/bilan_carbone_guide_facteurs_emissionsV5.pdf) >, consulté le 04 Mars 2015.

On y retrouve principalement les facteurs d'émissions des infrastructures industrielles de type entrepôts ou usines de production, ou encore les émissions associées aux véhicules de transports selon leur catégories PTAC.

En revanche, un certain nombre de données ont été créées par l'auteur lui-même, n'ayant pas accès à l'information réelle d'une compagnie en particulier. Cependant, nous avons veillé à ce que les données fictives soient au plus proche de la réalité. Surtout, nous avons attribué un effort particulier afin que la répartition des coûts inhérents aux activités de la chaîne d'approvisionnement soit réaliste.

Le chapitre suivant présente en détail les résultats de nos expérimentations. Le problème a été résolu à l'aide du solveur Lingo 15.0 et présente 6 680 variables continues, 3 360 variables entières, 36 497 non-zéros ainsi que 4 077 contraintes.





## **CHAPITRE 6**

### **EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS**

#### **6.1 Introduction**

Les expérimentations conduites dans cette section ont pour premier objectif d'identifier l'impact des décisions tactiques d'approvisionnement et de production de l'entreprise assujettie sur la facture environnementale annuelle. Par la suite, une analyse de sensibilité sera réalisée sur la hausse du prix moyen d'achat des composants éco-conçus afin de mettre en évidence l'influence majeure de ce paramètre sur le plan optimal de production adopté. L'idée est tout d'abord d'observer la structure de la chaîne d'approvisionnement sans aucune contrainte environnementale. De cette manière nous mettrons en évidence les décisions optimales d'approvisionnement et de production dans le cas où la compagnie n'est soumise à aucune de ces deux (2) réglementations. Par décisions optimales, nous entendons les meilleures décisions en termes de coûts logistiques pour l'entreprise. Par la suite, différents scénarios seront envisagés, parmi lesquels l'entreprise se retrouve assujettie à la loi sur la compensation, puis plus tard aux deux (2) lois combinées. Par la suite, nous admettrons l'hypothèse selon laquelle ces deux (2) législations sont amenées à se renforcer dans les prochaines années comme annoncé par les organismes gouvernementaux responsables. Nous mettrons en évidence les modifications tactiques éventuelles à apporter quant aux décisions optimales d'approvisionnement et de production, ainsi nous étudierons dans quelles mesures ces deux (2) réglementations peuvent s'avérer contraignantes pour la chaîne d'approvisionnement.

#### **6.2 Scénario de base : avant les réglementations environnementales**

Le premier scénario étudié ne tient donc pas compte des lois environnementales. Pour être plus précis, nous émettons l'hypothèse que l'entreprise n'y est pas encore assujettie et met sur le marché uniquement sa gamme traditionnelle de produit (i.e. produits de type standard).

La figure 6.1 présente la structure de coûts de notre chaîne d’approvisionnement dans ces conditions durant l’année *n*.

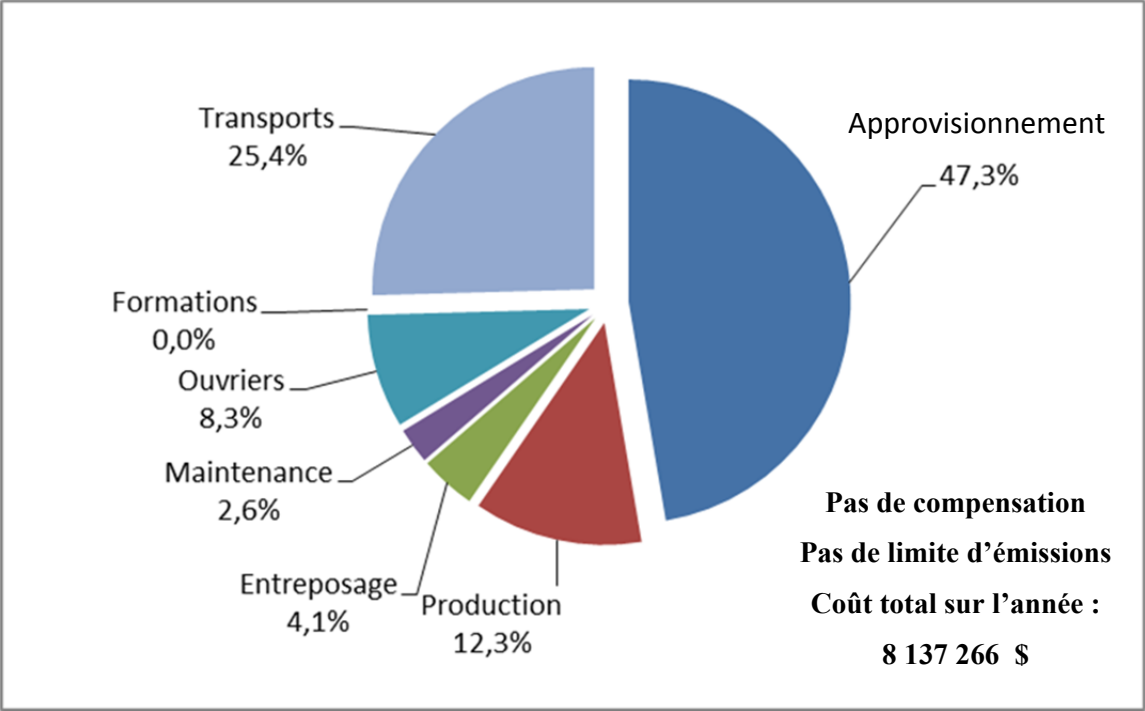


Figure 6.1. Répartition des coûts de la chaîne d’approvisionnement non soumise aux réglementations environnementales

Dans les conditions actuelles, la totalité des produits finis sont de type « standard » et sont assemblés aux usines sur l’ancienne technologie à partir des composants du BOM standard. À titre indicatif, le tableau 6.1 donne également les valeurs numériques correspondantes. En effet, étant donné que de nouveaux coûts (i.e. coûts environnementaux) entrent en ligne de compte par la suite, une comparaison basée uniquement sur des pourcentages serait biaisée, d’où l’utilité des données chiffrées.

Tableau 6.1 Récapitulatif des coûts et pourcentages associés de la chaîne logistique non soumise aux lois environnementales

Approvisionnement	Production	Entreposage	Maintenance	Ouvriers	Formations	Transports
3 850 000 \$	1 000 000 \$	330 694 \$	212 500 \$	675 000 \$	0 \$	2 069 072 \$
47,3%	12,3%	4,1%	2,6%	8,3%	0,0%	25,4%

Comme on peut le constater, l'approvisionnement en matières premières et le secteur des transports occupent ensemble plus de 72 % du total des coûts de la chaîne d'approvisionnement. On dépense un peu plus de 23 % en production/maintenance aux usines manufacturières sur l'ancienne technologie. Le reste des coûts se situe entre 4 et 5 % et est associé au stockage et aux opérations de manutention dans les centres de distribution (pour plus de simplicité, nous avons choisi de regrouper ces deux (2) activités en une (1) seule activité appelée « entreposage »). Dans les coûts exposés ci-dessus, on note qu'aucune formation n'a lieu pour le moment. La nouvelle technologie n'étant pas encore utilisée, il n'est pas nécessaire que les ouvriers reçoivent une quelconque formation.

### **6.3 Scénario 1 : Entreprise assujettie à la compensation**

Après ce bref constat de la situation dans laquelle se trouve la compagnie lorsqu'elle n'est assujettie à aucune loi environnementale, supposons maintenant qu'elle devient assujettie à la loi sur la compensation aux services de collecte. L'entreprise ignore pour le moment quel impact pourrait avoir une telle réglementation sur son activité et n'a aucune idée du montant de la facture annuelle associée.

Ainsi pour le moment, on suppose qu'aucune décision n'est prise quant à l'entrée sur le marché d'une gamme de produit vert, et les managers décident de conserver les anciennes pratiques et d'observer le plan d'approvisionnement/production habituel. Les produits finis sont toujours assemblés à partir du BOM standard et aux usines on utilise à 100 % l'ancienne technologie pour assembler les produits finis.

La figure 6.2 et le tableau 6.2 montrent la nouvelle structure de coûts de l’entreprise pour l’année  $n+1$ .

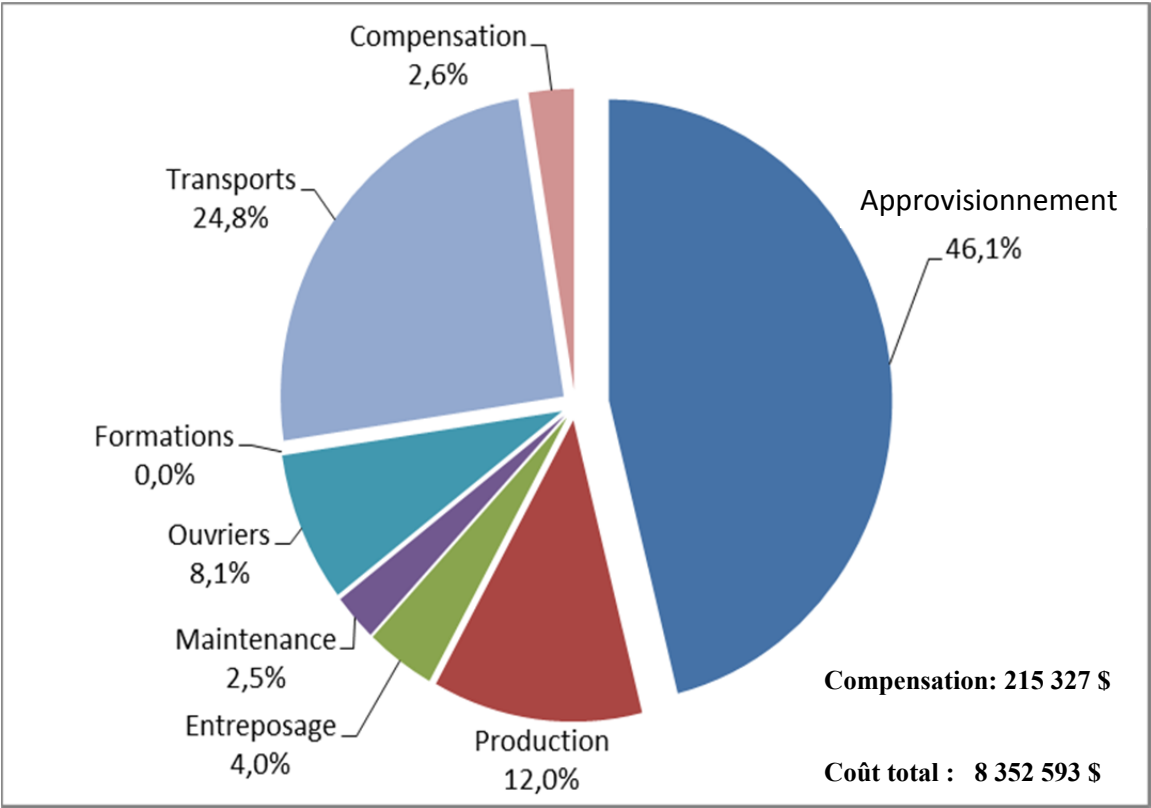


Figure 6.2. Répartition des coûts de la chaîne d’approvisionnement soumise à la loi sur la compensation aux services de collecte

Tableau 6.2. Récapitulatif des coûts et pourcentages associés de la chaîne logistique assujettie à la loi sur la compensation aux services de collecte

Approvisionnement	Production	Entreposage	Maintenance	Ouvriers	Formations	Transports	Compensation
3 850 000 \$	1 000 000 \$	330 694 \$	212 500 \$	675 000 \$	0 \$	2 069 072 \$	215 327 \$
46,1%	12,0%	4,0%	2,5%	8,1%	0,0%	24,8%	2,6%

Comme prévu, l’entreprise assujettie maintient son plan habituel comme en témoignent les valeurs numériques du tableau 6.2. Cependant, les pourcentages sont quelques peu différents du fait de l’apparition des coûts de compensation dans le montant total. Le bilan annuel est donc révélé, et la compagnie se retrouve avec une facture d’un montant de 215 327 \$ à payer

à l'organisme ÉEQ pour la compensation des services de collectes. De plus, elle voit son coût total augmenter de 8 137 266 \$ à 8 352 593 \$ soit 2.6 %.

Sur ce constat, un bilan des matières premières impliquées dans la fabrication des produits est réalisé afin d'analyser cette nouvelle facture environnementale. Le tableau 6.3 ainsi que la figure 6.3 permettent une meilleure compréhension du montant associé à la compensation (notons que les matières premières suivies d'une \* sont utilisées dans la fabrication des composants éco-conçus, utilisés uniquement dans le BOM vert.

Tableau 6.3. Justificatif de la facture associée à la compensation aux services de collecte

Composants	Matière première impliquée	Trimestre 1 (kg)	Trimestre 2 (kg)	Trimestre 3 (kg)	Trimestre 4 (kg)	Total (kg)	Tarifs en vigueur (cents/kg)	Compensation exigible par ÉEQ
C1	Aluminium	7 982	9 418	6 600	6 000	30 000	18,78	5 634 \$
C2	Acier	13 304	15 696	11 000	10 000	50 000	9,71	4 855 \$
C3	Verre	18 625	21 975	15 400	14 000	70 000	11,49	8 043 \$
C4	Carton	26 608	31 393	22 000	20 000	100 000	26,47	26 470 \$
C5	Plastique	66 519	78 481	55 000	50 000	250 000	68,13	170 325 \$
C6	Verre *	0	0	0	0	0	18,78	0 \$
C7	Carton *	0	0	0	0	0	9,71	0 \$
C8	Plastique *	0	0	0	0	0	11,49	0 \$
TOTAUX (kg)		133 038	156 963	110 000	100 000	500 000	GRAND TOTAL	215 327 \$

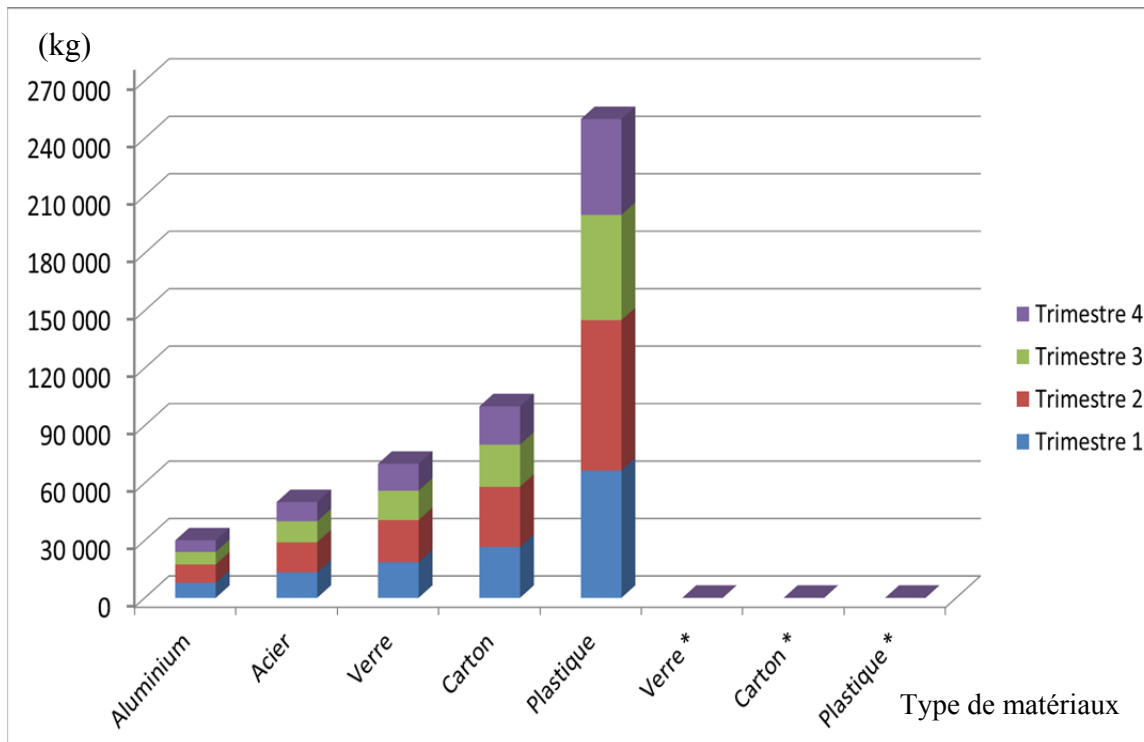


Figure 6.3. Synthèse des quantités de matières premières mises sur le marché durant l'année  $n+1$

Tout d'abord, on observe sans surprise que les trois (3) dernières lignes du tableau 6.3 ainsi que les trois (3) dernières barres du diagramme de la figure 6.3 sont toujours nulles. Bien entendu ces derniers ne concernent que les produits verts et composants éco-conçus donc ils n'entrent pas encore ici en ligne de compte. Ensuite, on peut observer les quantités exactes en kilogrammes pour chacune des matières premières utilisées pour la production, par type de matériaux et par trimestre. La nature de la demande implique deux (2) premiers trimestres plus chargés tandis que le plastique se démarque clairement des autres matériaux non seulement par les 250 tonnes mises sur le marché (soit 50 % du poids total) mais aussi par le tarif qui lui est propre à savoir 68.13 cents du kilogramme, parmi les valeurs les plus élevées exigibles par ÉEQ. C'est donc un total de 500 tonnes de matières premières qui entrent dans la composition de nos CEI et font l'objet d'une facture annuelle de 215 327 \$. Face à une telle situation, l'entreprise assujettie décide maintenant de changer sa politique et de mettre sur le marché la nouvelle gamme de produits verts récemment élaborée.

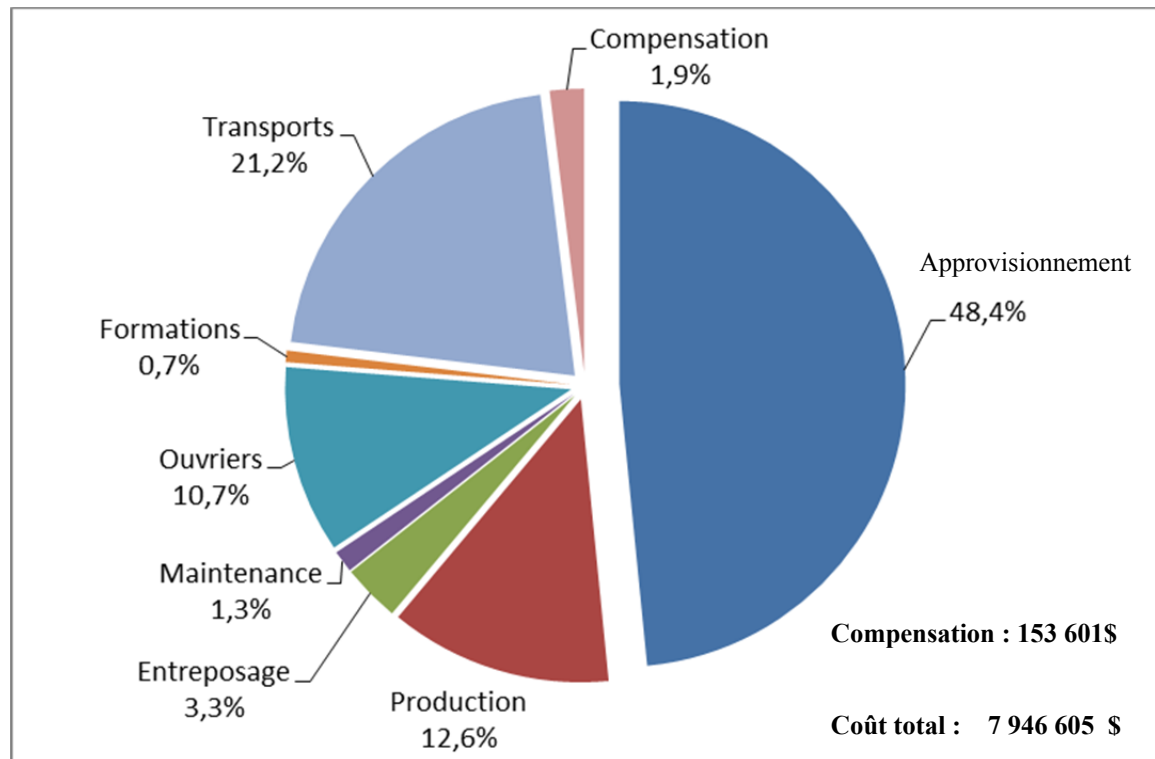


Figure 6.4. Structure de coûts de la chaîne d'approvisionnement: scénario standard versus vert

#### 6.4 Scénario 2: Gain potentiel sur la compensation

Bien entendu, l'éco-conception présente un certain coût et donc cela va très probablement engendrer une hausse du prix d'acquisition des composants  $\{r_6, r_7, r_8\}$ . Cependant, avant d'effectuer une analyse de sensibilité à ce sujet, observons l'impact de la production verte à prix d'achat équivalent pour les composants éco-conçus. La figure 6.4 montre le résultat d'une production 100 % verte.

Le constat ici est clair, la gamme de produit vert permet de réduire les coûts de 8 352 593\$ à 7 946 605\$ soit une économie de 4.9 % sur le coût total de la chaîne d'approvisionnement. De plus, il est intéressant de noter que l'on réalise ici une économie de 2.4 % par rapport au scénario initial, lorsque l'entreprise n'était pas encore assujettie à la compensation. Dans ce cas précis, cela voudrait dire que dans de pareilles conditions, le scénario vert serait

profitable à l'entreprise même si celle-ci n'est soumise à aucune réglementation environnementale. Cependant, de telles conclusions ne seraient pas réalistes puisque nous avons posé l'hypothèse que les composants standard se vendent au même prix que les composants éco-conçus, ce qui est peu probable. Avant d'observer l'effet d'une hausse des prix d'acquisition, analysons les coûts plus en détail.

Premièrement, l'assemblage de la totalité des produits sur la nouvelle technologie engendre des coûts additionnels pour la formation de 112 ouvriers. Le tableau 6.4 donne le nombre de formations requises à chaque trimestre.

Tableau 6.4. Nombre d'ouvriers formés sur la nouvelle technologie à chaque période

Période	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4
Employés formés	29	35	25	23

De ce fait, l'ensemble des ouvriers travaillant sur la nouvelle technologie bénéficie d'une hausse de leur taux horaire, on observe une augmentation de 26 % du budget alloué aux salaires de ces derniers sur l'horizon de planification considéré. On peut néanmoins observer des améliorations dans plusieurs secteurs, comme par exemple les frais de maintenance qui diminuent de 53 % du fait de la meilleure performance de la nouvelle technologie ainsi que son parfait état. Aussi, les nouveaux produits sont plus simples à déplacer, charger et décharger des camions étant donné la réduction significative apportée au poids total des chargements. Les opérations de manutention étant facilitées, on observe une baisse de 27 % du budget initial prévu à cet effet. Voyons maintenant les améliorations apportées par la réduction des poids et volume de cette nouvelle gamme de produit vert. Le tableau 6.5 et la figure 6.5 reprennent les mêmes informations que le tableau 6.3 et la figure 6.3 dans le cas cette fois-ci du scénario vert.



Tableau 6.5. Quantités de matières premières impliquées dans le scénario vert

Composants	Matière première impliquée	Trimestre 1 (kg)	Trimestre 2 (kg)	Trimestre 3 (kg)	Trimestre 4 (kg)	Total (kg)	Tarifs en vigueur (cents/kg)	Compensation exigible par ÉEQ
C1	Aluminium	7 813	9 587	6 600	6 000	30 000	18,78	5 634 \$
C2	Acier	13 022	15 978	11 000	10 000	50 000	9,71	4 855 \$
C3	Verre	0	0	0	0	0	11,49	0 \$
C4	Carton	0	0	0	0	0	26,47	0 \$
C5	Plastique	0	0	0	0	0	68,13	0 \$
C6	Verre *	10 418	12 782	8 800	8 000	40 000	11,49	4 596 \$
C7	Carton *	15 627	19 173	13 200	12 000	60 000	26,47	15 882 \$
C8	Plastique *	46 880	57 520	39 600	36 000	180 000	68,13	122 634 \$
TOTAUX (kg)		93 760	115 040	79 200	72 000	360 000	GRAND TOTAL	153 601 \$

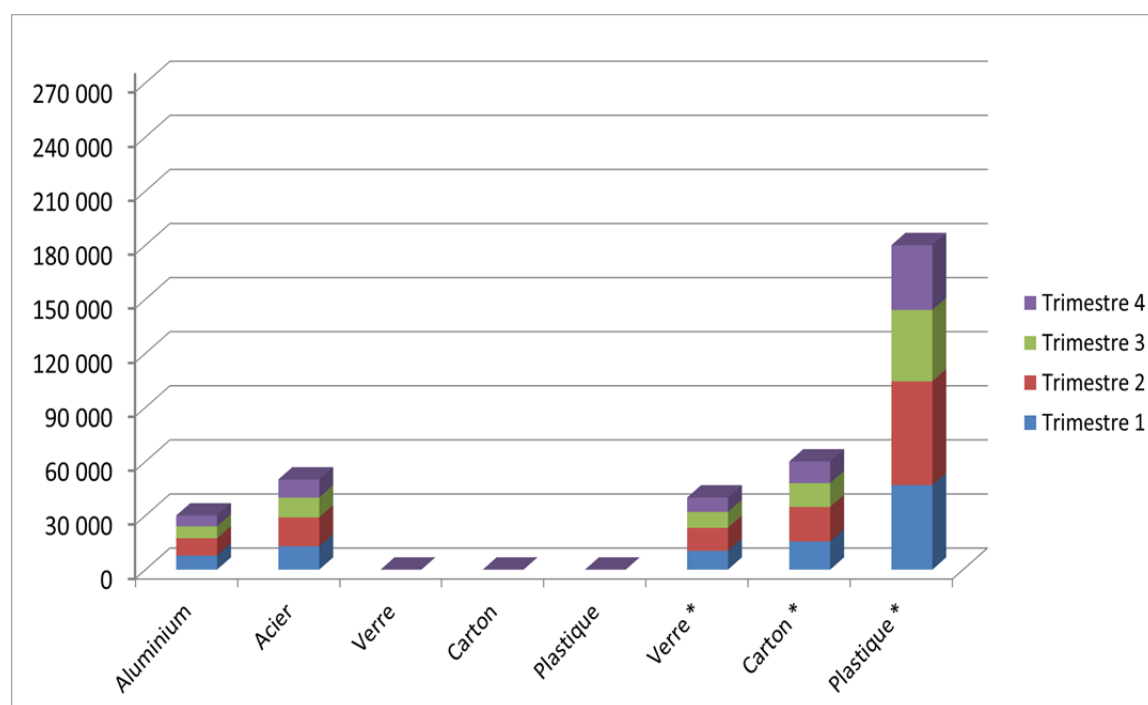


Figure 6.5. Synthèse des quantités de matières premières impliquées dans le scénario vert

Les composants du BOM standard sont remplacés par ceux du BOM vert, permettant ainsi une production entièrement basée sur la nouvelle gamme de produits verts. Par ce moyen, l'entreprise assujettie parvient à réduire le poids total de CEI mis sur le marché à la disposition des consommateurs et donc elle peut réduire sa facture environnementale. Dans le scénario précédent, la demande des clients est satisfaite par une production 100 % standard et

le montant de la compensation due aux services de collecte s'élevait à 215 327 \$. Le scénario présent permet ainsi de réduire cette facture à 153 601 \$, soit une diminution de 28.7 % permettant de faire passer la facture environnementale sous la barre des 2 % du total des coûts de la chaîne d'approvisionnement.

Cependant, sur les 4.9 % d'économies réalisées pour l'ensemble de l'entreprise, une grande partie provient du secteur des transports. En effet, les 2 069 072 \$ encourus dans le scénario standard baissent jusqu'à 1 681 235 \$ (18.70 % de réduction). Les tableaux 6.6, 6.7 et 6.8 fournissent de plus amples informations à ce sujet.

Tableau 6.6. Scénario standard versus vert : poids transportés

Poids transportés (kg)	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	<b>Total</b>
Scénario standard	133 038	156 963	110 000	100 000	<b>500 000</b>
Scénario Vert	93 760	115 040	79 200	72 000	<b>360 000</b>
Diminution (%)	29,5	26,7	28,0	28,0	<b>28,0</b>

Tableau 6.7. Scénario standard versus vert : volumes transportés

Volumes transportés (mètres cubes)	Scénario standard	Scénario Vert	réduction (%)
Trimestre 1	1 330	1 120	15,8
Trimestre 2	1 570	1 374	12,5
Trimestre 3	1 100	946	14,0
Trimestre 4	1 000	860	14,0
<b>Total</b>	<b>5 000</b>	<b>4 300</b>	<b>14,0</b>

Tableau 6.8. Scénario standard versus vert : véhicules utilisés pour les livraisons

Véhicules utilisés (unités)	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	<b>Total</b>
Scénario standard	306	367	258	238	<b>1169</b>
Scénario vert	264	323	223	208	<b>1018</b>
Diminution (%)	13,7	12,0	13,6	12,6	<b>12,9</b>

Nous avons désormais une meilleure idée sur les économies réalisées dans le secteur des transports. D'un côté, on remarque une baisse globale de 28 % du poids transporté (composants et produits finis inclus) ainsi qu'une baisse de 14 % du volume total occupé par la marchandise. L'éco-conception des composants et la création de cette nouvelle gamme de produit vert auront donc permis une réduction du nombre de véhicules requis de 1169 à 1018 sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Cependant, ce travail d'éco-conception présente en réalité un certain coût. Le scénario vert présenté ci-avant apparaît profitable dans ces conditions (i.e. composants des BOM standard et verts vendus au même prix) mais qu'en est-il si les prix des nouveaux composants augmentent? Regardons de plus près l'influence du coût d'acquisition des nouveaux composants.

Cette fois-ci, le but n'est pas d'étudier un scénario pour lequel la production est 100 % standard ou bien 100 % verte. Auparavant, nous avons étudié le scénario standard car il s'agissait de la situation initiale de l'entreprise avant qu'elle étudie l'opportunité d'introduire sur le marché une gamme de produits verts. Par la suite nous avons étudié le scénario vert car il représentait intuitivement la meilleure solution dans le cadre de la réduction maximale de la facture environnementale. Étant donné que la demande des clients peut être satisfaite aussi bien par l'une ou l'autre des deux versions du produit fini, nous allons faire varier le prix d'achat de nos composants verts et observer les conséquences sur les décisions optimales de production verte versus standard. Ainsi, il se pourrait que le scénario optimal pour notre entreprise ne soit pas 100 % standard ou vert, mais plutôt un compromis entre les deux (2) types de scénarios. La figure 6.6 nous montre les résultats obtenus.

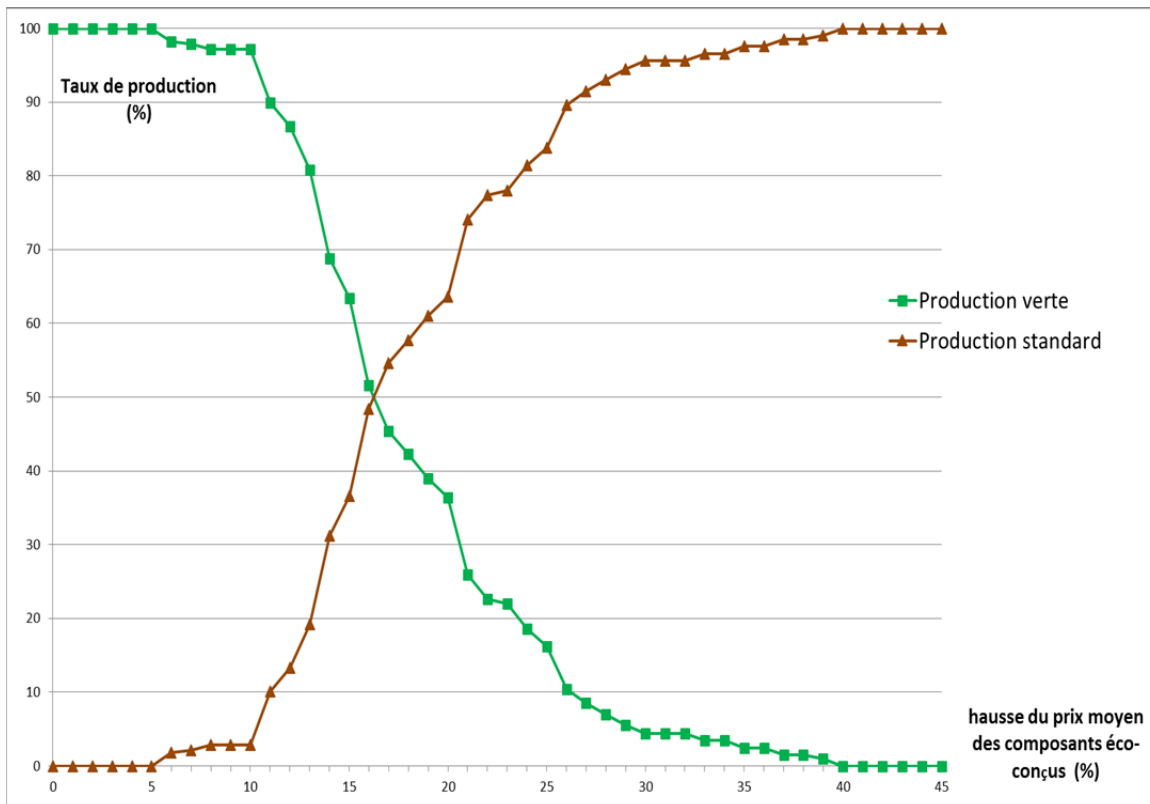


Figure 6.6. Taux de production des produits verts VS standard en fonction de la hausse du prix d'achat des composants éco-conçus

Comme constaté précédemment pour des prix d'acquisition identiques, l'optimisation suggère une production verte à 100 % et une satisfaction de la demande uniquement avec la nouvelle gamme de produits. Cependant, déjà à partir d'une hausse de 6 % en moyenne chez nos fournisseurs, un compromis est recommandé. Plus la hausse est importante et plus le niveau de production verte recommandé décroît, jusqu'à arriver à égalité (50 % standard et 50 % vert) si les composants éco-conçus sont vendus en moyenne 16.5 % plus chers que leurs homologues standard. Au-delà de cette valeur, la production standard est majoritairement suggérée jusqu'à une hausse du prix d'acquisition de 39.5 % pour laquelle il est fortement recommandé de ne plus fabriquer la gamme de produit vert. En admettant par exemple que les fournisseurs vendent leurs composants verts 20 % plus chers que les composants standards, la chaîne d'approvisionnement présenterait la structure de coûts exposée à la figure 6.7.

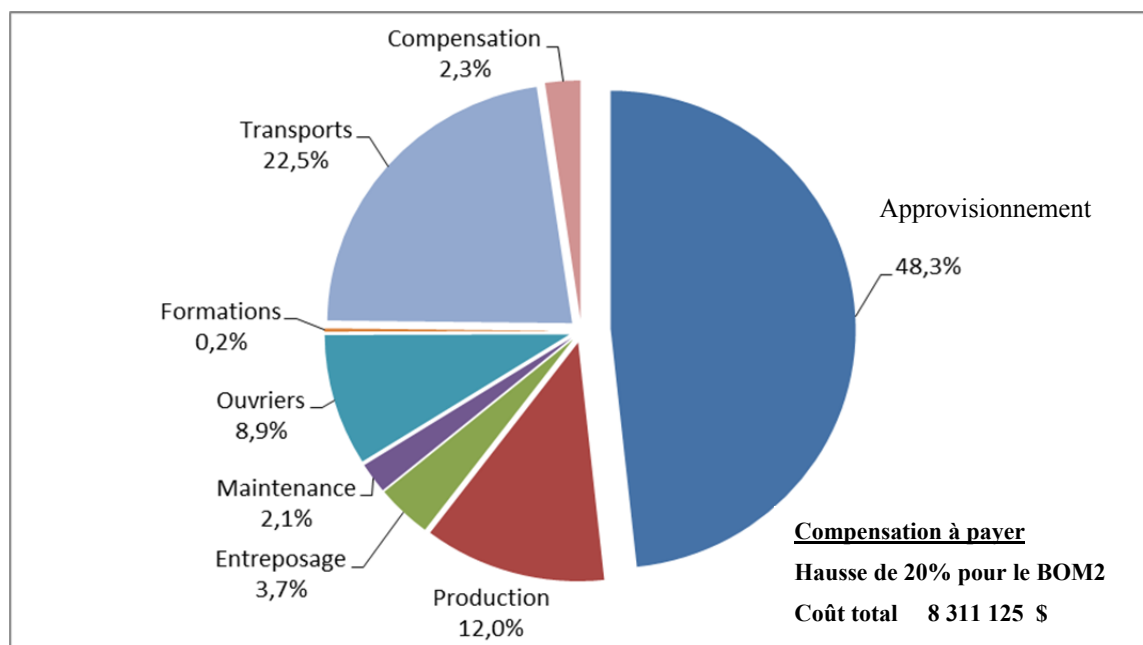


Figure 6.7. Structure de coûts de la chaîne logistique pour une hausse de 20 % des coûts d'acquisition des composants verts

Dans ce scénario, la décision optimale consiste à produire 36.5 % de la nouvelle gamme de produit et 63.5 % de la version standard. L'approvisionnement passe de 3 850 000 \$ à 4 013 957 \$ et la compensation aux services de collecte s'élèverait à 192 837 \$, représentant ainsi un total de 2.3 % de l'ensemble des coûts de l'entreprise. Le tableau 6.9 et la figure 6.8 présentent le nouveau bilan de matières premières de notre entreprise.

Tableau 6.9. Hausse de 20 % du prix d'acquisition des composants verts : bilan des matières premières impliquées dans la compensation

Composants	Matière première impliquée	Trimestre 1 (kg)	Trimestre 2 (kg)	Trimestre 3 (kg)	Trimestre 4 (kg)	Total (kg)	Tarifs en vigueur (cents/kg)	Compensation exigible par ÉEQ
C1	Aluminium	8 092	9 308	6 600	6 000	30 000	18,78	5 634 \$
C2	Acier	13 486	15 514	11 000	10 000	50 000	9,71	4 855 \$
C3	Verre	12 941	8 071	12 248	11 236	44 496	11,49	5 113 \$
C4	Carton	18 487	11 530	17 497	16 051	63 565	26,47	16 826 \$
C5	Plastique	46 218	28 826	43 741	40 128	158 913	68,13	108 267 \$
C6	Verre *	3 394	7 799	1 801	1 580	14 574	11,49	1 675 \$
C7	Carton *	5 091	11 699	2 702	2 369	21 861	26,47	5 787 \$
C8	Plastique *	15 273	35 096	8 106	7 108	65 583	68,13	44 682 \$
TOTAUX (kg)		122 981	127 844	103 695	94 472	448 991	GRAND TOTAL	192 837 \$

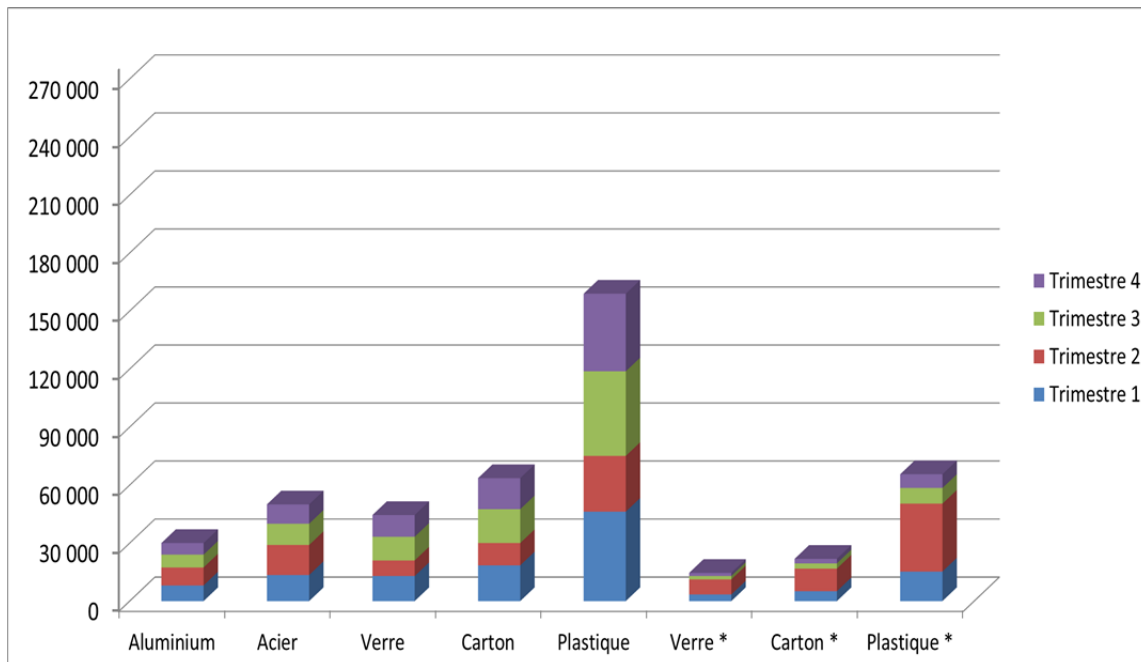


Figure 6.8. Quantités de matières premières mises sur le marché en kg : scénario hausse de 20 % du prix d'acquisition

Dans ce cas précis, les deux BOM sont utilisés ainsi que les deux technologies de production. Sur les 112 employés requis pour assurer la production aux usines, seulement 48 d'entre eux devront suivre une formation sur la nouvelle technologie tandis que les 74 employés restants continueront de travailler sur l'ancienne technologie.

Le plan d'approvisionnement/production suggère donc un compromis entre les gammes de produits finis standard et verts. En effet, augmenter le taux de fabrication des produits verts présenterait un impact financier négatif pour l'entreprise à cause du prix plus élevé d'acquisition des composants éco-conçus. D'un autre côté, l'augmentation du taux de fabrication des produits standard engendrerait également un impact financier négatif à cause d'une augmentation de la compensation, mais principalement à cause de la hausse des coûts dans le secteur des transports. Les tableaux 6.10, 6.11 et 6.12 récapitulent les poids et volumes transportés ainsi que le nombre de véhicules nécessaires pour les livraisons de composants et produits finis.

Tableau 6.10. Scénario +20 % : poids transportés en kilogrammes

Poids transportés (kg)	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	<b>Total</b>
Scénario standard	133 038	156 963	110 000	100 000	<b>500 000</b>
Scénario +20%	118 991	138 750	100 011	91 239	<b>448 991</b>
Scénario Vert	93 760	115 040	79 200	72 000	<b>360 000</b>

Tableau 6.11. Scénario +20 % : Volumes transportés en m<sup>3</sup>

Volumes transportés (mètres cubes)	Scénario standard	Scénario Vert	Scénario +20%
Trimestre 1	1 330	1 120	1 289
Trimestre 2	1 570	1 374	1 415
Trimestre 3	1 100	946	1 068
Trimestre 4	1 000	860	972

Tableau 6.12. Scénario +20 % : Nombre de véhicules requis pour les livraisons

Véhicules utilisés (unités)	Trimestre 1	Trimestre 1	Trimestre 1	Trimestre 1	<b>Total</b>
Scénario standard	306	367	258	238	<b>1169</b>
Scénario hausse de 20%	300	344	259	238	<b>1137</b>
Scénario vert	264	323	223	208	<b>1018</b>

## 6.5 Scénario 3 : Entreprise assujettie à la compensation et au SPEDE

Jusqu'à maintenant, la chaîne d'approvisionnement étudiée représentait une entreprise assujettie uniquement à la loi sur la compensation aux services de collecte. Nous avons pu constater que dans notre cas précis, le coût maximal infligé en fin d'année par le gouvernement du Québec s'élève à 215 327 \$ de compensation dans le cas où l'entreprise ne prendrait aucune mesure à ce propos. La facture annuelle environnementale n'excéderait ainsi pas les 2.6 % du coût total de la chaîne logistique. Qu'en est-il si l'entreprise en question devient également assujettie au SPEDE et doit désormais rendre des comptes sur ses niveaux d'émissions de GES? Le scénario de base à la section 6.2 représente l'année  $n$ , c'est à dire le cas de l'entreprise avant qu'elle soit assujettie aux lois environnementales. Par la suite à la section 6.3, nous sont présentés les résultats de l'année  $n+1$ , lorsque l'entreprise

devient assujettie à la compensation et reçoit pour la première fois une facture environnementale. La présente section étudie l'année  $n+2$ , année au terme de laquelle l'entreprise reçoit une double facture : compensation et émissions de GES. Afin de pouvoir comparer avec la section 6.3, nous supposons qu'aucune mesure n'est prise par la compagnie pour réorienter ses activités. Les managers jugent la facture de la compensation tolérable et choisissent de ne pas modifier leur plan tactique de production. Le tableau 6.13 montre un bilan des émissions durant l'année  $n+2$ .

Tableau 6.13. Bilan carbone annuel de l'entreprise assujettie aux limitations d'émissions

x	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	TOTAUX
Emissions (tCO <sub>2</sub> e)	76 937	81 516	65 662	62 052	286 167
Droit d'émission (tCO <sub>2</sub> e)	68 000	68 000	68 000	68 000	272 000
Prix d'achat/vente d'un crédit carbone (\$)	13,68	13,68	13,68	13,68	x
Besoin d'achat de crédits supplémentaires (tCO <sub>2</sub> e)	8 937	13 516	0	0	22 453
Revente possible de crédits carbone (tCO <sub>2</sub> e)	0	0	2 338	5 948	8 286
<b>MONTANT A DEBOURSER (\$)</b>	122 257	184 902	0	0	307 159
<b>BENEFICE REALISE (\$)</b>	0	0	31 988	81 364	113 351
<b>Bilan carbone annuel : perte de 193 808 \$</b>					

*(Rappel : Pour les données relatives aux limitations d'émissions gouvernementales et aux prix d'achat/vente des crédits carbone, se référer aux sections 5.4.2 et 5.4.3).*

Comme le montrent les résultats ci-dessus si aucun changement n'est réalisé, l'entreprise n'est pas en mesure de respecter les quotas d'émissions qui lui sont alloués durant l'année  $n+2$ . La demande étant moins élevée lors des deux (2) derniers trimestres, l'entreprise respecte les limitations et se trouve même en mesure de revendre quelques crédits carbone en fin d'année. Cependant, la forte demande des deux (2) premiers trimestres impose une forte activité industrielle et les dépassements d'émissions en période 1 et 2 sont trop élevés pour permettre à l'entreprise assujettie de ne pas acheter de crédits supplémentaires. Sur une autorisation d'émission de 272 000 tonnes métriques d'équivalent carbone pendant l'année, l'entreprise émet 286 167 tonnes, soit 14 167 tCO<sub>2</sub> excédentaires. L'obligation d'achat de



crédits additionnels engendre donc une perte financière s'élevant à 193 808 \$ pour l'année  $n+2$ .

La figure 6.9 récapitule la structure de coûts de la chaîne d'approvisionnement assujettie aux deux (2) lois environnementales, si cette dernière prend la décision de maintenir son plan habituel d'approvisionnement/production (i.e. scénario standard).

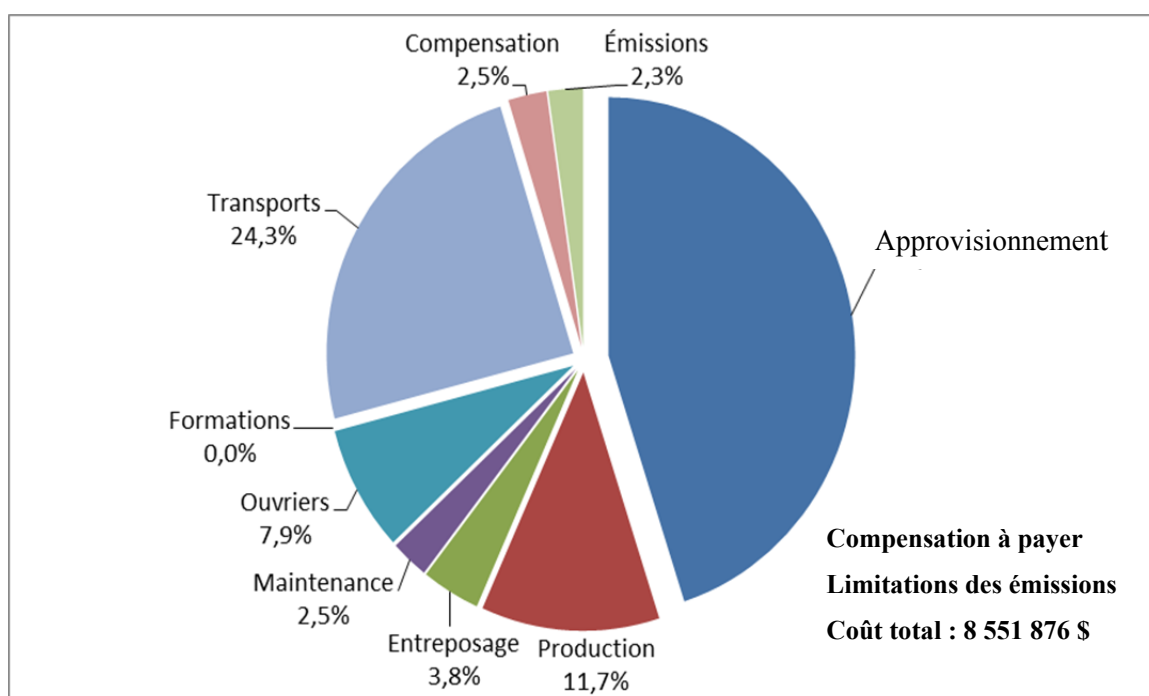


Figure 6.9. Structure de coûts de la chaîne logistique soumise aux deux (2) lois environnementales : scénario 100 % de production standard

Les quotas d'émissions alloués par le gouvernement sont donc dépassés et cela implique des coûts supplémentaires. Les émissions de GES représentent 2.3 % du coût total de la chaîne d'approvisionnement, et sont réparties comme suit à la figure 6.10.

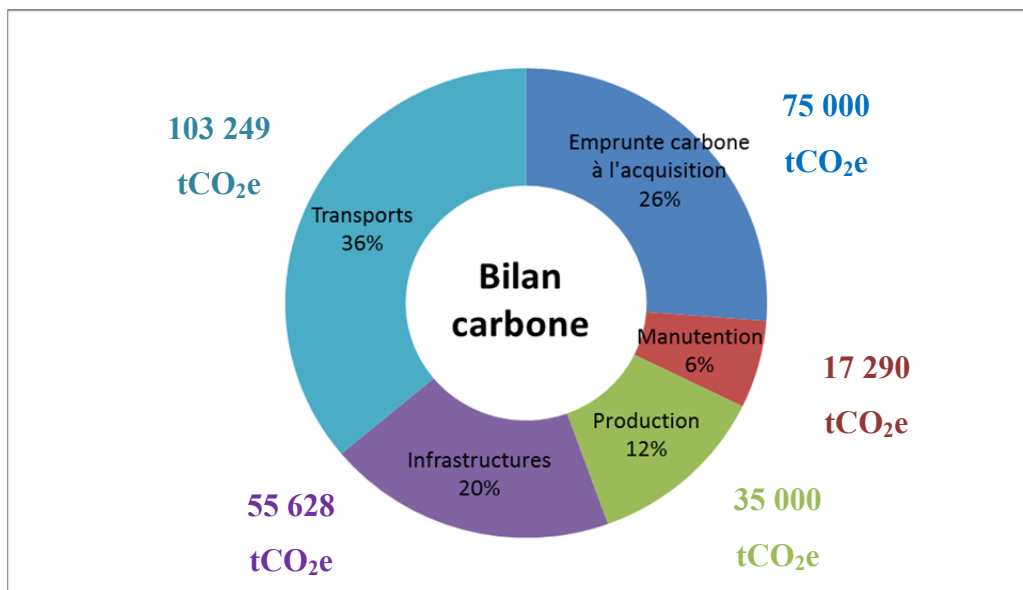


Figure 6.10. Répartition des émissions de GES par secteurs d'activités

Les infrastructures logistiques (i.e. usines et entrepôts) sont responsables à hauteur de 20 % du niveau d'émission total (Chauffage, électricité, climatisation, gestion et traitement des déchets, *etc.*). Les activités annexes propres à la manutention des produits au sein même des bâtiments représentent environ 6 % (chargement et déchargement des véhicules, déplacement interne, stockage *etc.*). Les activités directement en rapport avec l'assemblage/fabrication des produits finis sur les machines de production comptabilisent 12 % du niveau d'émissions. L'une des principales causes du niveau élevé d'émissions se trouve être l'emprunte carbone du composant au moment de l'acquisition de ce dernier chez le fournisseur. Par-là, on entend considérer l'impact de tous les procédés nécessaires à la fabrication des composants et ce depuis l'extraction des matières premières qui le composent afin de donner un avantage aux composants verts. L'emprunte carbone représentent 26 % des émissions totales, soit plus d'un quart de l'ensemble des émissions dans le scénario standard. Enfin, le secteur des transports est, comme bien souvent, le principal responsable des émissions de GES, à savoir ici 36 % à lui seul.

## 6.6 Scénario 4: Gain potentiel combiné

Cette fois-ci pour l'année  $n+2$ , la facture environnementale annuelle de l'entreprise s'élève à 4.8 % du coût total de la chaîne d'approvisionnement (2.5 % de compensation + 2.3 % de droits d'émissions supplémentaires), représentant 409 135 \$ de frais potentiellement évitables. Les managers décident donc de s'intéresser à l'insertion de la nouvelle gamme de produits verts sur le marché pour l'année  $n+3$ . De la même manière qu'à la section 6.4, nous allons dans un premier temps supposer que le prix d'acquisition des composants éco-conçus est identique à celui des composants standard. La figure 6.11 montre le gain maximal apporté par le scénario vert.

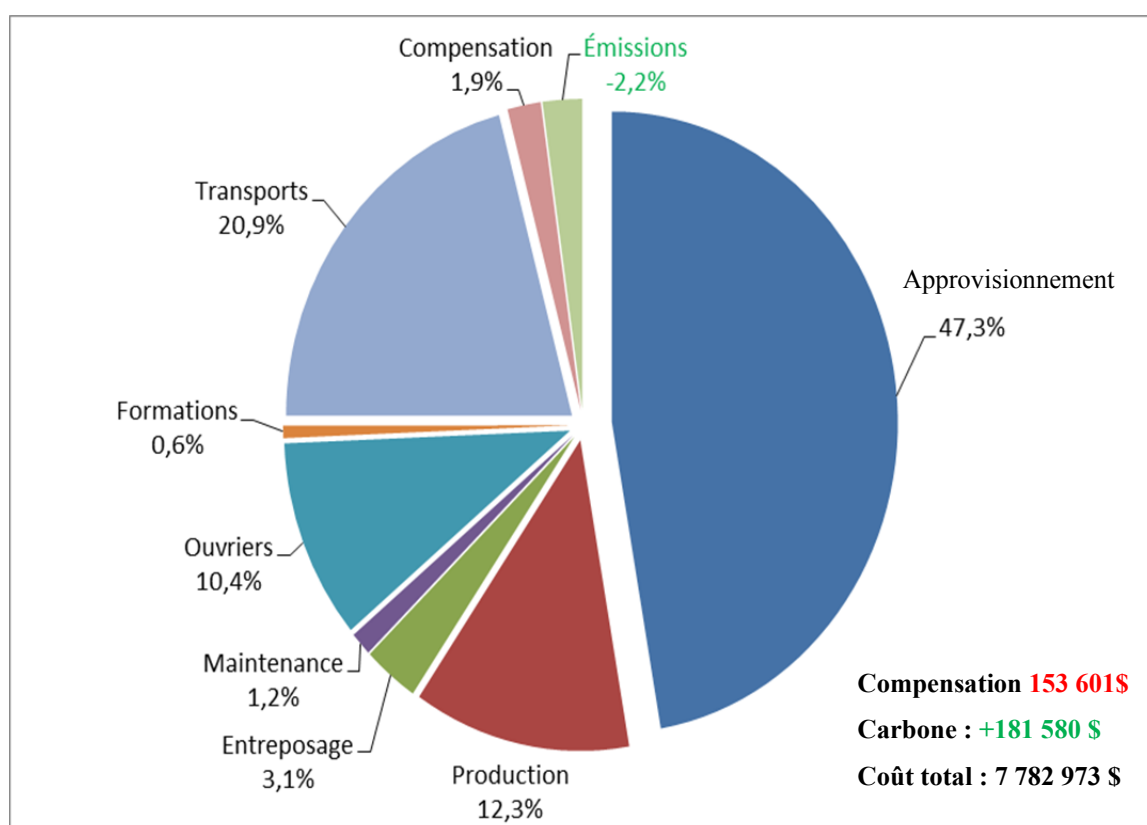


Figure 6.11. Entreprise assujettie aux deux (2) lois environnementales : scénario vert

Les résultats donnés par le remplacement complet de la gamme de produit standard par la nouvelle gamme de produit sont ici très encourageants. En effet, le coût total de la chaîne logistique passe de 8 352 593 \$ à 7 782 973 \$, représentant ainsi une amélioration de 6.8 %. De plus dans ce scénario précis, on remarque que l'on parvient à réduire le niveau d'émissions de manière assez importante pour que la revente de crédits carbone permette à notre entreprise de couvrir sa facture de compensation. Ainsi, l'entreprise se retrouve en fin d'année avec un bilan environnemental positif. Le bilan des matières premières impliquées dans le scénario vert ayant déjà été établi en section 6.4. Cependant, le tableau 6.14 nous en apprend plus sur les nouvelles quantités d'émissions trimestrielles associées à nos activités logistiques.

Tableau 6.14. Quantités d'émissions impliquées dans le scénario vert

x	Trimestre 1	Trimestre 2	Trimestre 3	Trimestre 4	TOTAUX
Emissions (tCO <sub>2</sub> e)	65 551	76 711	59 763	56 702	258 727
Droit d'émission (tCO <sub>2</sub> e)	68 000	68 000	68 000	68 000	272 000
Prix d'achat/vente d'un crédit carbone (\$)	13,68	13,68	13,68	13,68	x
Besoin d'achat de crédits supplémentaires (tCO <sub>2</sub> e)	0	8 711	0	0	8 711
Revente possible de crédits carbone (tCO <sub>2</sub> e)	2 449	0	8 237	11 298	21 984
<b>MONTANT A DÉBOURSER (\$)</b>	0	119 165	0	0	119 165
<b>BÉNÉFICE REALISÉ (\$)</b>	33 505	0	112 685	154 555	300 745
<b>Bilan carbone annuel : bénéfice de 181 580 \$</b>					

Contrairement au scénario standard, le scénario vert permet de respecter les limitations d'émissions dans trois (3) trimestres sur quatre (4) considérés. Le seul trimestre qui demeure problématique est le second, avec toujours un dépassement de 8 711 tonnes de carbone équivalent au moment où la demande la plus forte sur l'année. Cependant, les faibles émissions engendrées lors des trois (3) autres périodes permettent de contrebalancer l'excès commis en période 2 et même de revendre des crédits carbones excédentaires. Sur 272 000 tCO<sub>2</sub>e autorisées par le gouvernement, l'entreprise n'émet que 258 727 tCO<sub>2</sub>e et réalise ainsi un bénéfice supplémentaire de 181 580 \$ en ayant revendu les droits d'émissions pour 13 273 tCO<sub>2</sub>e sur le marché du carbone au prix de 13.68 \$ la tonne. Quel que soit le plan

d'approvisionnement et de production tactiques appliqués par l'entreprise, aucun des scénarios ne permet de respecter les limitations d'émissions à chacun des trimestres, cependant pour un niveau assez élevé de production verte, les excès commis durant certaines périodes de l'année peuvent être compensés. Encore une fois, l'approvisionnement étant responsable de plus de 45 % du coût total de la chaîne d'approvisionnement, le coût d'acquisition des composants verts joue un rôle majeur dans les choix du BOM standard versus BOM vert et dans décisions tactiques de production de l'entreprise pouvant donner lieu à certains compromis. Une analyse de sensibilité sur la hausse du prix d'achat de ces derniers a été réalisée, cette fois-ci dans le cas où la compagnie est assujettie aux deux (2) réglementations. Voir les résultats à la figure 6.12.

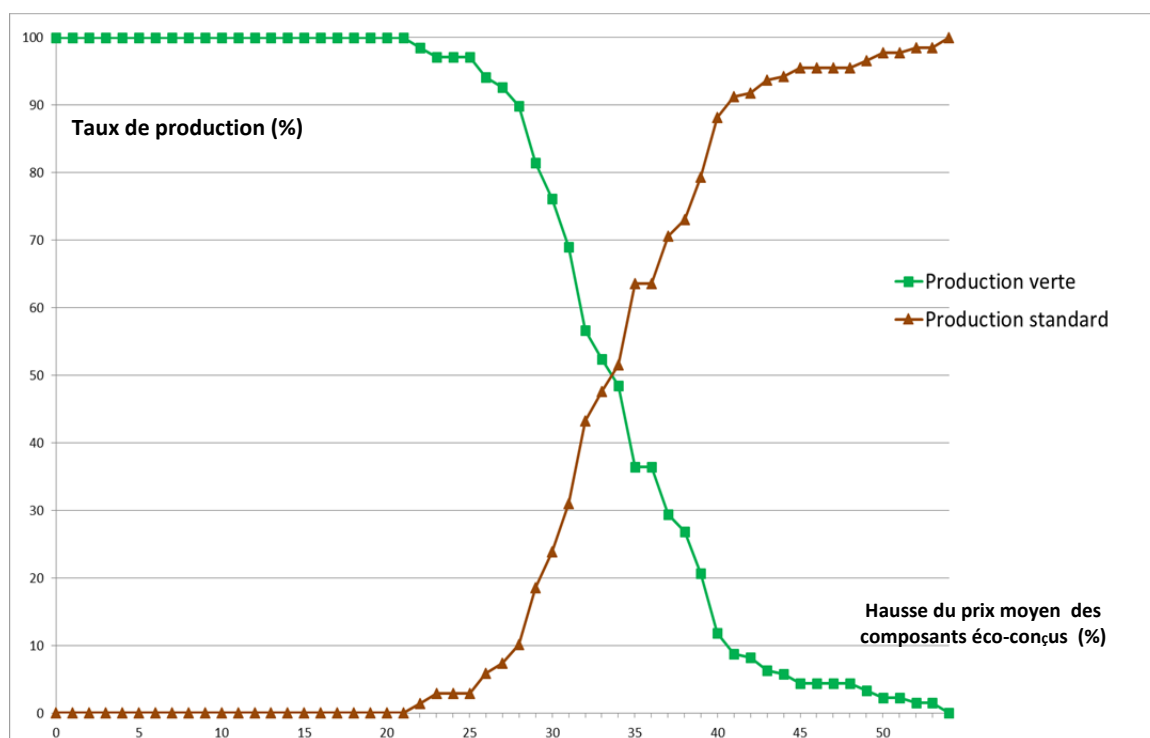


Figure 6.12. Taux de production vert VS standard en fonction de la hausse du prix d'achat des composants éco conçus : entreprise assujettie aux deux (2) réglementations

Dans le cas présent, lorsque l'entreprise est assujettie aux deux lois simultanément, le scénario vert représente le scénario optimal jusqu'à un accroissement de 21.5 % du prix d'achat moyen des composants éco conçus. On se souvient que dans le cas où l'entreprise

était assujettie uniquement à la compensation, ce palier était atteint dès 6 % d'augmentation. Dès lors, il fallait faire un compromis entre les deux (2) gammes de produit. De plus, précédemment lorsqu'on arrivait au cap des 16.5% de hausse du prix d'achat, le plan tactique optimal (c'est-à-dire les meilleures décisions de production pour l'entreprise) recommandait une production à part égale (50 % de produits verts et 50 % de produits standard). Ici, ce second palier n'est atteint que si les fournisseurs augmentent leurs prix moyen de vente de 33.5 % pour les composants verts. Enfin, l'arrêt complet de la production pour la nouvelle gamme de produit était recommandé à partir d'un accroissement de 39.5 % du prix contre 54 % dans le cas d'une double réglementation environnementale. On remarque donc que dans le cas où la compagnie doublement assujettie souhaite introduire sur le marché sa nouvelle gamme de produit, elle dispose d'une plus grande flexibilité quant aux variations des prix d'acquisition de ses nouveaux composants avant d'être forcée d'interrompre la production sur la nouvelle technologie. En fait, bien qu'être assujetti simultanément à plusieurs réglementations augmente la facture environnementale en fin d'année, c'est en même temps avantageux, car on dispose d'une meilleure marge de manœuvre et d'une double incitation pour le lancement de la nouvelle gamme de produits verts. La figure 6.13 nous informe plus au sujet du bilan carbone.

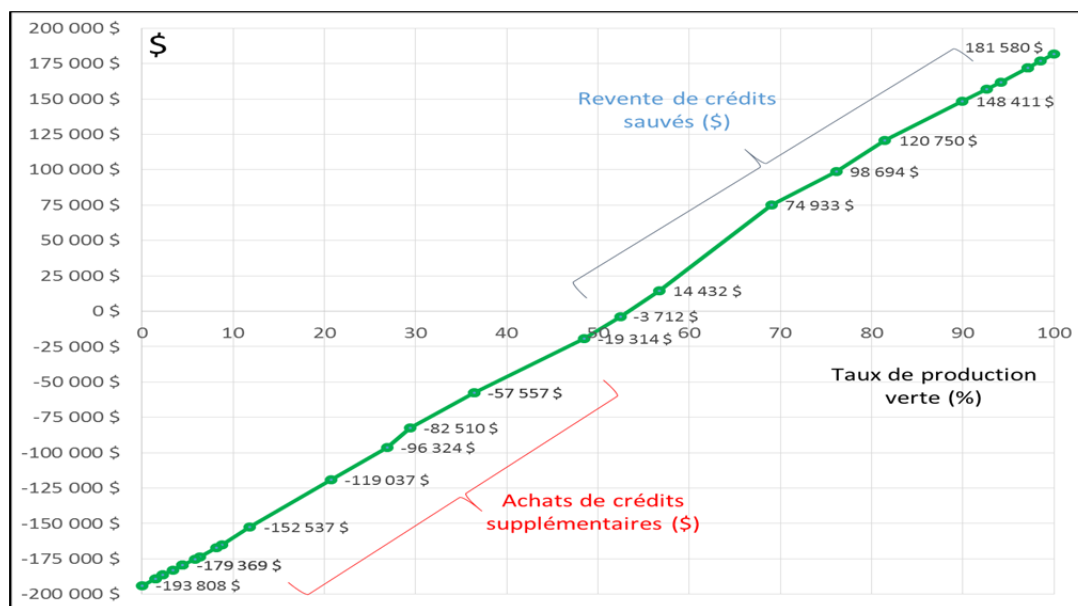


Figure 6.13. Impact du taux de production verte sur le bilan carbone de l'entreprise

Après vérification à l'aide du solveur Lingo 15.0, c'est pour un taux de 53 % de production verte que nous rencontrons la limite gouvernementale des 272 000 tCO<sub>2</sub>e. En dessous de ce niveau de production, nous émettons plus que les quotas alloués et nous devons acheter des droits d'émettre supplémentaires. Au-dessus de ce palier, nous avons la possibilité d'en revendre sur le marché du carbone et réaliser des bénéfices.

De la même manière, plus nous produisons la nouvelle gamme de produits en grande quantité et plus le poids total des CEI mis sur le marché à la disposition des consommateurs diminue. Dans ces conditions, la facture de la compensation annuelle aux services de collecte diminue également. La figure 6.14 nous renseigne sur les montants de compensation à payer à ÉEQ ainsi que sur les poids impliqués.

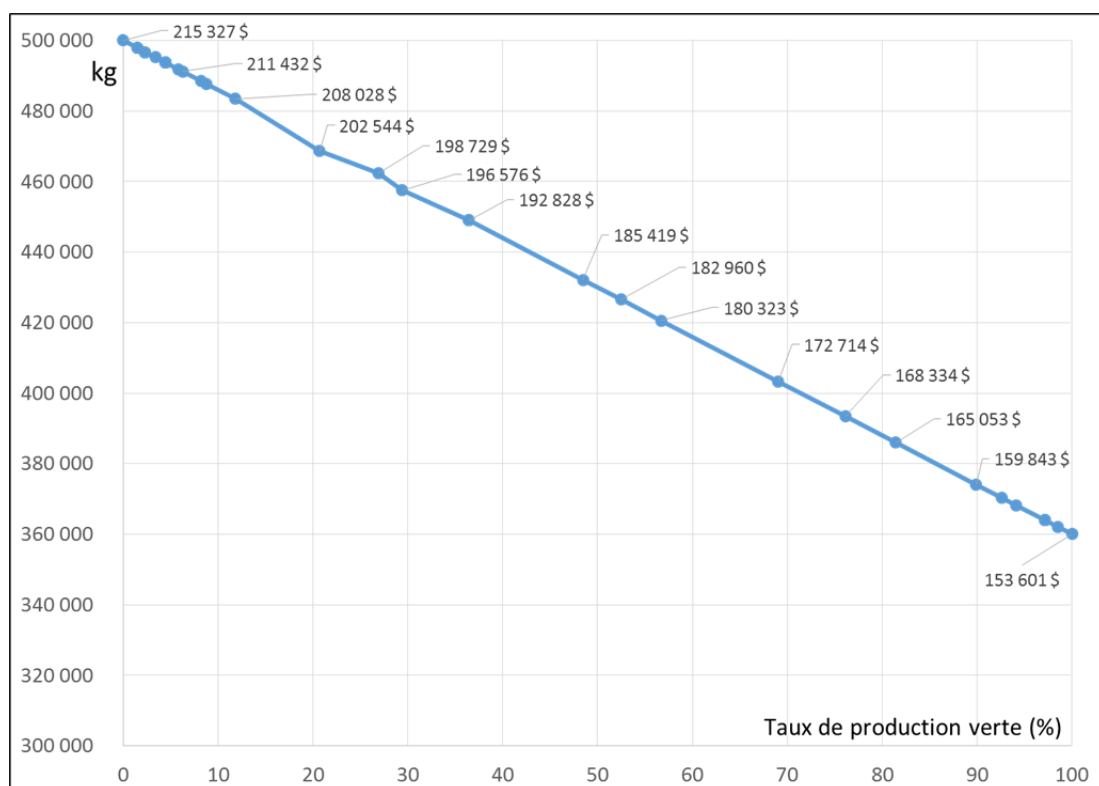


Figure 6.14. Impact du taux de production verte sur le poids transporté et la compensation

En annexe II, le lecteur trouvera un tableau détaillant les résultats concernant l'analyse de sensibilité sur la hausse du prix d'achat des composants éco-conçus. Avant de passer à la

section suivante qui traite des années à venir et d'un possible renforcement de ces deux législations, les tableaux 6.15 et 6.16 synthétisent les observations présentées ci-avant.

Tableau 6.15. Scénarios verts versus scénarios standard : récapitulatif de l'information

RÉCAPITULATIF	Facture environnementale		Impact sur les coûts annuels de l'entreprise		Gain potentiel apporté par le scénario vert
	Compensation	Bilan carbone	Coût total de la chaîne	% de la facture environnementale	
<i>Entreprise non assujettie</i>	x	x	8 137 266 \$	0%	x
<i>Entreprise assujettie à la compensation: <b>scénario standard</b></i>	215 327 \$	x	8 352 593 \$	2,6%	4,9% sur le coût total
<i>Entreprise assujettie à la compensation: <b>scénario vert</b></i>	153 601 \$	x	7 946 605 \$	1,9%	
<i>Entreprise assujettie à la compensation et au SPEDE : <b>scénario standard</b></i>	215 327 \$	achat de crédits: 193 808 \$	8 551 876 \$	4,8%	6,8% sur le coût total
<i>Entreprise assujettie à la compensation et au SPEDE : <b>scénario vert</b></i>	153 601 \$	revente de crédits: 181 580 \$	7 782 973 \$	positive : + 0,4%	

Tableau 6.16. Compromis entre production verte versus production standard en fonction de la hausse du prix d'acquisition des composants verts : Synthèse

Niveaux de production optimaux en fonction de la hausse du prix d'achat des composants du BOM 2 ( $\Omega$ )	Scénario vert optimal	Production sur la nouvelle technologie dominante	production verte VS standard : 50/50	Production sur l'ancienne technologie dominante	Scénario standard optimal
<i>Entreprise non assujettie</i>	x	x	x	x	Unique possibilité
<i>Entreprise assujettie à la compensation</i>	$\Omega < 6\%$	$6\% \leq \Omega < 16,5\%$	$\Omega = 16,5\%$	$16,5\% < \Omega < 39,5\%$	$\Omega \geq 39,5\%$
<i>Entreprise assujettie à la compensation et au SPEDE</i>	$\Omega < 21,5\%$	$21,5\% \leq \Omega < 33,5\%$	$\Omega = 33,5\%$	$33,5\% < \Omega < 54\%$	$\Omega \geq 54\%$

Pour une lecture simplifiée de ce tableau, nous avons appelé oméga ( $\Omega$ ) la hausse moyenne du prix d'achat des composants verts.



## 6.7 Scénario 5 : Cas d'un renforcement futur des législations

Au cours de la partie précédente de ce chapitre, nous avons tenté de faire la lumière dans un premier temps sur l'impact financier des deux (2) réglementations sur notre chaîne d'approvisionnement. Pour agir sur la facture environnementale de la compagnie, nous avons évalué l'impact de l'implémentation d'une nouvelle gamme de produits verts et observé les différents plans tactiques optimaux de production en fonction du prix d'achat des composants éco-conçus. Aussi, à chaque étape, nous avons évalué l'impact des décisions de production sur le montant de la compensation dans un premier temps, puis par la suite sur les niveaux d'émissions de GES. La dernière partie de ce chapitre est un peu différente de la partie précédente dans le sens où cette fois-ci, il ne s'agit plus d'observer l'impact de l'approvisionnement et de la production sur la facture environnementale de l'entreprise, mais plutôt l'inverse. En effet à partir de maintenant, nous allons fixer les prix d'acquisition de nos composants verts à  $\Omega = 33.5\%$  plus cher en moyenne que les composants standard. Notons que dans la suite de cette étude nous considérons désormais que l'entreprise sera assujettie aux deux (2) lois environnementales. La figure 6.15 nous montre où nous nous situons sur le graphique présenté en figure 6.12.

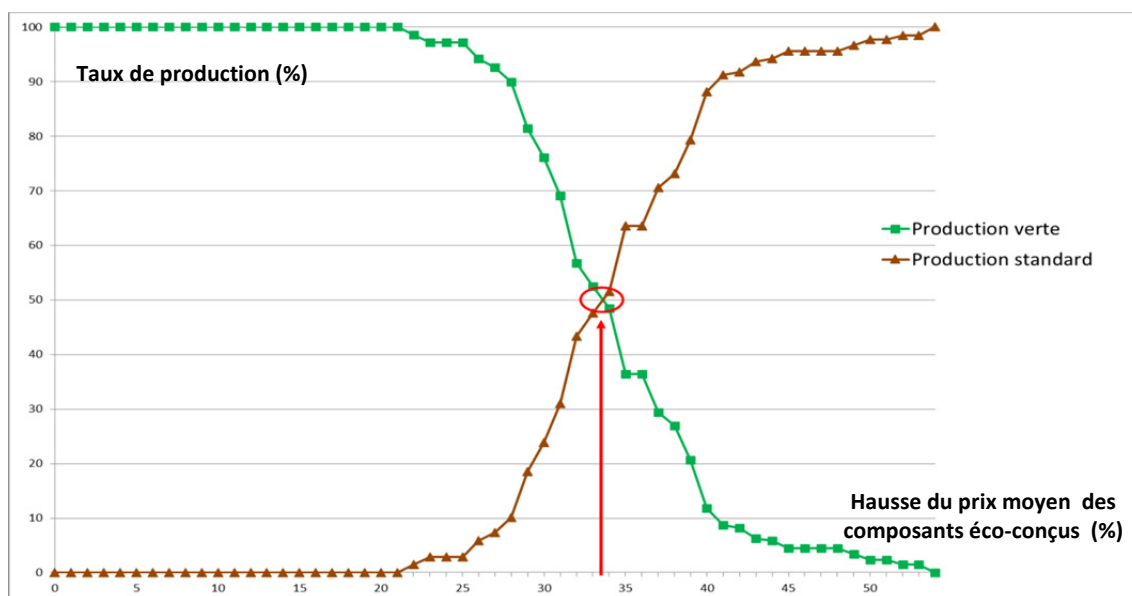


Figure 6.15. Entreprise assujettie aux deux (2) lois environnementales :  $\Omega = 33.5\%$

On émet l'hypothèse que les décisionnaires optent finalement pour l'introduction sur le marché de la nouvelle gamme de produit en vue d'agir sur sa facture environnementale. Ayant pris contact avec leurs fournisseurs, ils se voient proposés les composants nécessaires pour le BOM vert à un prix moyen 33.5 % plus élevé que pour le BOM initial et jugent l'offre acceptable. Ainsi, comme indiqué dans le tableau 6.16, le plan optimal de production préconisé par notre modèle mathématique suggère une production annuelle répartie de manière équitable entre produits verts et produits standard. Avant d'évaluer l'impact d'un renforcement des deux (2) législations environnementales sur l'entreprise assujettie, la figure 6.16 présente la structure de coût de la chaîne logistique dans le contexte actuel.

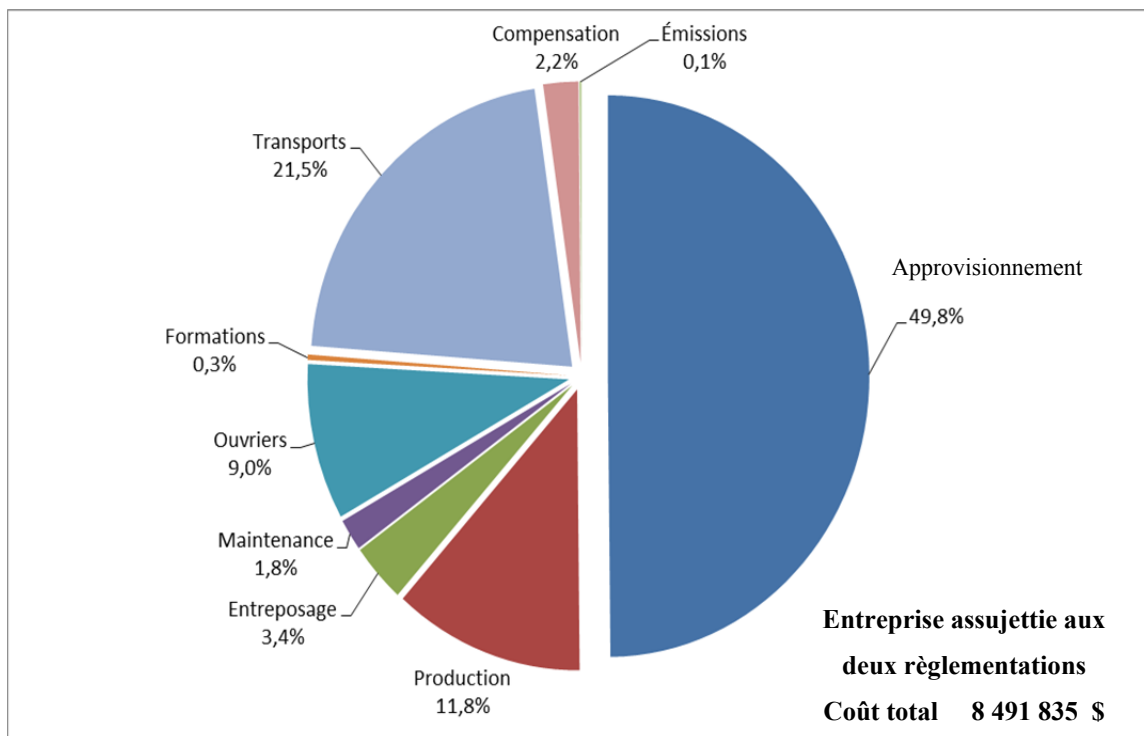


Figure 6.16. Structure de coûts de la chaîne d'approvisionnement pour  $\Omega = 33.5\%$

Ce scénario présente un coût global de 8 491 835 \$, soit une amélioration de 0.7 % par rapport au scénario 100 % standard évalué à la figure 5.9. Malgré une augmentation du coût total d'approvisionnement de 3 850 000 \$ à 4 232 687 \$ due à l'utilisation du BOM vert à hauteur de 50 %, l'entreprise parvient tout de même à diminuer légèrement ses coûts annuels

grâce à la production verte et son impact positif sur la compensation et le bilan carbone. Effectivement ici, on arrive à diminuer le coût total de la chaîne d'approvisionnement d'environ 60 000 dollars tout en ayant réduit la facture environnementale qui passe de 409 135 \$ à 195 593 \$. Ceci est explicable en partie par la réduction de 215 327 \$ de compensation à 183 988 dans le scénario actuel, mais surtout l'entreprise est parvenu à stabiliser ses émissions de GES puisque le bilan carbone indique un dépassement de seulement 848 tCO<sub>2</sub>e sur les 272 000 tCO<sub>2</sub>e autorisés. Ainsi l'achat de crédits supplémentaires représente seulement 11 605 \$, c'est-à-dire environ 0.1 % du total de la chaîne logistique.

Admettons maintenant que ces résultats concernent l'année  $n+3$  comme mentionné précédemment. L'entreprise assujettie a pris la décision d'introduire sa nouvelle gamme de produit sur le marché et l'opération est un succès puisqu'à la fois elle a réduit sensiblement ses coûts mais surtout elle a diminué son impact environnemental et sa facture de plus de la moitié (52 %). Dans le cas actuel le plan optimal de production préconise la mise sur le marché de 50 % de produits verts et 50 % de produits standard, mais qu'en sera-t-il dans les prochaines années si les législations environnementales se renforcent? Nous allons maintenant évaluer quel serait le plan optimal de production en supposant que les prix d'achat des composants ne varie pas ( $\Omega = 33.5\%$ ). Afin d'éviter un travail long et fastidieux qui ferait varier les paramètres de la loi sur la compensation d'abord, puis les paramètres de la loi sur les limitations d'émissions ensuite, et enfin les deux conjointement, nous nous concentrerons un renforcement simultané des deux lois.

Concernant le marché du carbone, les estimations s'accordent à dire qu'une hausse du prix d'achat et de revente des droits d'émissions est à prévoir d'ici la fin des trois périodes de conformité en vigueur en 2020 (voir section 2.4.3). Aussi, les tarifs établis par ÉEQ augmentent sensiblement chaque année. Depuis que les entreprises sont responsables de la totalité des frais de collecte en 2013, on a déjà noté une hausse du prix moyen des tarifs de compensation de 3.2 % entre 2013 et 2014. Il nous paraît donc cohérent de renforcer les législations en place au moyen des deux paramètres  $\theta$  et  $z$  (le lecteur trouvera un rappel de la

signification de ces derniers en page suivante). Le tableau ci-dessous montre l'impact d'un renforcement des législations à hauteur de 10 % supplémentaires chaque année par rapport au scénario de base (i.e. le scénario ci-dessus en figure 6.16).

Tableau 6.17. Impact d'un renforcement des législations sur le plan tactique optimal de production dans les prochaines années

Année de référence	n+3	n+4	n+5	n+6	n+7	n+8	n+9
Scénario *	BASE	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Compensation	183 988 \$	193 127 \$	199 770 \$	207 797 \$	221 400 \$	233 059 \$	248 596 \$
Poids de matières premières impliqué	428 920 kg	409 828 kg	389 199 kg	374 158 kg	370 301 kg	364 018 kg	360 000 kg
Bilan carbone	-11 605 \$	64 837 \$	135 528 \$	200 156 \$	227 746 \$	290 408 \$	311 254 \$
Quantité d'émission	272 848 tCO <sub>2</sub> e	267 691 tCO <sub>2</sub> e	263 744 tCO <sub>2</sub> e	260 745 tCO <sub>2</sub> e	260 108 tCO <sub>2</sub> e	259 274 tCO <sub>2</sub> e	258 727 tCO <sub>2</sub> e
Coût total	8 491 835 \$	8 508 098 \$	8 515 698 \$	8 519 879 \$	8 520 251 \$	8 521 307 \$	8 522 170 \$
Production verte (%)	50,0	64,4	79,1	89,9	92,7	97,2	100
Production standard (%)	50,0	35,6	21,9	10,1	7,3	2,8	0

(\*) Signifie que le couple  $(\theta, z)$  augmente à la hauteur indiquée dans la case « scénario »,  $\theta$  représentant le prix d'achat / revende d'un droit d'émission d'une tCO<sub>2</sub>e (en \$) et  $z$  étant le tarif appliqué à la compensation exigible pour un kilogramme de chacune des matières premières considérées (en cents/kg). Cela signifie que pour l'année  $n+4$  par exemple, le prix d'achat de chacun des composants verts augmente de 10 % et le prix d'achat / revende de la tonne de CO<sub>2</sub> équivalent revient à :  $\theta_{\text{initial}} + 10 \% = 13.68 \$ \times 1.1 = 15.05 \$$ . Pour les valeurs exactes du couple  $(\theta, z)$  dans chacun des scénarios  $\{n + 3, \dots, n + 9\}$  le lecteur peut se référer à l'annexe III. La toute première observation des résultats de nos simulations suggère que partant d'un niveau de production équitable pour nos deux gammes de produits, il est

recommandé d'accroître progressivement le niveau de production sur la nouvelle technologie et de remplacer petit à petit les produits standards par les produits verts au fur et à mesure que les législations se durcissent. En effet, on remarque que si on prend comme année de référence l'année  $n+3$  alors le scénario vert devient le scénario optimal 6 ans plus tard au cours de l'année  $n+9$ . Bien que l'on parvienne à réduire progressivement le poids total transporté dans notre chaîne d'approvisionnement à hauteur de 16 % en 6 ans, l'augmentation des tarifs d'année en année est trop importante pour que l'on puisse empêcher une hausse de la facture de compensation aux services de collecte. Cependant, il est important de noter que sans ajustement du plan de production de l'année  $n+3$ , le montant de la compensation exigible en année  $n+9$  par ÉEQ serait de  $183\,988 \$ + 60 \% = 294\,381 \$$  alors que le plan optimal de production permet de descendre la facture à 248 596 \$. De plus, n'oublions pas que l'ajustement du plan de production effectué de manière progressive permettrait de sauver un montant total de 186 554 \$ si l'on cumule les 6 années de hausse des tarifs.

Au sujet du bilan carbone, on remarque que déjà dans le scénario de base nous sommes dans une situation presque équilibrée entre les émissions de la chaîne logistique et les quotas alloués par le gouvernement. Ainsi, avec l'augmentation du taux de production verte, on arrive rapidement à passer sous le seuil autorisé et comme nous l'avons vu précédemment (fig. 6.13) à partir d'un niveau de 53 % de production sur la nouvelle technologie, il est possible de revendre des crédits sur le marché du carbone. Plus le niveau de production verte est élevé et plus on est en mesure de réaliser des bénéfices grâce à la revente de droits d'émissions. C'est pourquoi une hausse dans la valeur du paramètre  $\theta$  encourage clairement une réorientation du plan tactique d'approvisionnement et de production vers le BOM vert et la nouvelle technologie. Bien que sur les 6 années étudiées le niveau d'émissions ne baisse pas énormément (de 272 848 tCO<sub>2</sub>e pour  $n+3$  à 258 727 tCO<sub>2</sub>e pour  $n+9$ , soit uniquement 5.1 %), la hausse de la valeur des droits d'émissions de 13.68 \$ à 21.89 \$ permet de réaliser d'importants bénéfices grâce à la revente de crédits si l'entreprise ajuste son plan de production. Un rapide calcul montre ici que si l'entreprise maintient son plan actuel de production (année  $n+3$ ), elle maintient aussi son niveau d'émissions à 272 848 tCO<sub>2</sub>e annuel

et devra acheter un droit d'émettre supplémentaire pour ces 848 tonnes de carbone équivalent durant les 6 années suivantes soit 93 958 \$ de pertes. En ajustant son plan de production, elle réaliserait un bénéfice de 1 229 929 \$ sur 6 ans soit une moyenne de 204 988 \$ par année, de quoi amortir potentiellement l'achat de la nouvelle technologie dont nous n'avons pas tenu compte dans ce travail par soucis de concentration sur les décisions d'un niveau tactique. On remarque qu'à partir d'un niveau de production verte de 90 % environ, la revente de droits d'émissions sur le marché du carbone permettrait de couvrir la facture de compensation et d'atteindre une facture environnementale globale positive. Malgré les résultats environnementaux prometteurs attendus dans le cas d'un ajustement du plan de production de la compagnie, il n'en reste pas moins que le niveau de production verte augmente de pair avec le coût d'approvisionnement des matériaux éco-conçus présents dans le BOM vert. En effet on peut constater que même si notre modèle d'optimisation permet des économies sur les coûts environnementaux au fil des années et du renforcement des législations, nous ne parvenons tout de même pas à réduire le coût total de la chaîne d'approvisionnement comme lors de la première partie de ce chapitre avant que les lois se durcissent. Cependant, il est encourageant de constater que le coût total de la chaîne logistique reste assez stable (de 8 491 835 \$ à 8 522 170 \$ de  $n+3$  à  $n+9$  soit une hausse d'à peine 0.35 %) malgré des législations de plus en plus dures au fil des années.

## 6.8 Conclusion

Lors de ce chapitre, nous avons tout d'abord établi la situation de l'entreprise étudiée avant qu'elle ne soit soumise aux réglementations environnementales. Par la suite, nous avons évalué l'impact de la loi sur la compensation aux services de collectes ainsi que l'impact de cette même loi combinée avec la réglementation sur les limitations de droits d'émissions de GES de notre chaîne d'approvisionnement. Nous avons dans un premier temps mis en évidence la supériorité du scénario vert par rapport au scénario standard dans le cas où les composants éco-conçus seraient vendus à un prix similaire à celui des composants standard. Par la suite, nous avons réalisé une analyse de sensibilité sur le paramètre oméga ( $\Omega$ ) représentant le pourcentage moyen de hausse du coût d'acquisition des composants présents

dans le BOM vert. Par cette analyse nous avons été en mesure d'établir le plan optimal de production en fonction du paramètre  $\Omega$ , indiquant dans quelle mesure il est préférable de remplacer l'ancienne gamme de produit par la gamme de produits verts. Pour chacun des scénarios optimaux suggérés, nous avons associé les montants de compensation exigibles par l'organisme ÉEQ ainsi que le bilan carbone de la compagnie. Par la suite, nous avons fixé la valeur du paramètre  $\Omega$  à un niveau de 33.5 % de hausse du prix d'achat moyen des composants verts, établissant ainsi le meilleur plan de production avec 50 % de produits verts et 50 % de produits standards. À partir de là, l'évaluation d'un renforcement des deux (2) législations a été étudié au moyen de 6 scénarios différents, durcissant progressivement les lois au cours de prochaines années et encourageant une évolution maîtrisée du plan d'approvisionnement et de production appliqué par l'entreprise. Les résultats suggèrent que malgré des réglementations de plus en plus strictes chaque année, notre modèle d'optimisation permettrait d'amortir de manière significative la hausse du coût total de la chaîne d'approvisionnement considérée qui demeure pour ainsi dire stable au fil du temps.





## **CONCLUSION**

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés à une chaîne d'approvisionnement assujettie à deux (2) législations environnementales actuellement en vigueur dans la province de Québec au Canada. La première d'entre elle est la loi sur la compensation aux services de collecte, qui entre dans le contexte bien connu du principe de responsabilité élargie des producteurs (REP). La seconde fait référence au système de plafonnement et d'échange des droits d'émissions (SPEDE) et aux limitations des droits d'émissions de GES délivrés par le gouvernement québécois aux compagnies assujetties. La première est en vigueur depuis 2005 tandis que la seconde est plus récente et en application depuis 2013 seulement. Toutes deux tentent d'imposer aux entreprises locales un certain niveau de contrôle sur l'impact environnemental associé à leurs activités industrielles, sans quoi ces dernières risquent de voir leur facture annuelle augmenter par des pénalités financières. Si certaines entreprises québécoises de par leur taille et/ou secteur d'activité ne sont que peu ou pas touchées par ces deux (2) réglementations gouvernementales, d'autres en revanche accusent une facture environnementale trop élevée à leur goût et souhaitent amorcer un processus de changement.

### **Contribution du travail de recherche**

Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un modèle mathématique linéaire d'optimisation proposant d'étudier la planification tactique d'approvisionnement et de production de la chaîne d'approvisionnement dans le cadre d'entreprises soumises à ces réglementations environnementales. Nous avons étudié la possibilité d'introduire sur le marché une nouvelle gamme de produits verts assemblés à partir d'un BOM alternatif comportant des composants éco-conçus. Ces nouveaux produits verts, bien qu'appartenant à la même famille que les anciens, sont sensiblement plus légers et moins volumineux que les produits standard. Ils présentent aussi bien des avantages vis-à-vis de la compensation qu'en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Partant de ces hypothèses de base nous avons réalisé une série d'expérimentations afin d'évaluer dans quelles mesures l'introduction de cette nouvelle gamme de produit pourrait s'avérer bénéfique pour

l'entreprise assujettie. Bien que l'étude du plan optimal de production soit prépondérante, elle est intimement liée aux décisions tactiques d'approvisionnement puisque les deux (2) types de produits finis sont assemblés à partir de deux (2) BOM différents. De plus, chacun des deux (2) BOM est associé à une technologie manufacturière unique : l'ancienne technologie assemble uniquement le BOM standard et la nouvelle technologie est réservée au BOM vert.

Les résultats de nos diverses simulations suggèrent que l'introduction de la nouvelle gamme de produits verts permet des économies plus ou moins importantes en fonction du prix d'acquisition des composants éco conçus. En effet la proportion considérable occupée par les coûts d'approvisionnement au sein de la chaîne nous a conduits dans un premier temps à effectuer une analyse de sensibilité sur la hausse du prix moyen d'achat des composants du BOM vert. Ce travail d'analyse nous a permis d'évaluer les meilleures décisions d'approvisionnement et par extension de trouver le plan tactique optimal de production pour chacun des scénarios envisagés. Ces multiples expérimentations nous ont permis d'estimer dans le même temps l'impact de notre plan d'approvisionnement et de production sur la facture environnementale de l'entreprise et nous avons précisé pour chacune d'entre elles les coûts de compensation associés ainsi que le bilan carbone de la compagnie assujettie à nos deux (2) législations sur une base annuelle.

Ce qui ressort principalement de cette réflexion nous encourage à introduire la nouvelle gamme de produits avec précaution. En effet, si les composants verts se vendent trop cher chez nos fournisseurs, toutes les économies réalisées tant sur le bilan purement logistique que sur la facture environnementale s'avèrent inutiles puisqu'ils sont surpassés par des coûts d'achat de matières premières trop importants. En revanche, si l'éco-conception ne se vend pas trop cher, l'introduction de la gamme de produit vert se révèle être une bonne alternative pour réduire l'impact environnemental de la compagnie tout en réduisant le coût global de la chaîne d'approvisionnement dans le même temps. Par la suite, nous avons réalisé plusieurs simulations nous permettant d'envisager un durcissement des législations en vigueur au cours des prochaines années dans la province de Québec, comme annoncé par les organismes concernés. Si la première partie de notre travail étudie plutôt l'impact de notre plan

d'approvisionnement et de production sur la facture environnementale de la compagnie assujettie, cette seconde étape en revanche se concentre sur l'impact d'un renforcement des législations sur notre plan tactique optimal de production. Les résultats suggèrent que si ces lois venaient à se durcir, notre modèle d'optimisation se révélerait également efficace et permettrait à l'entreprise assujettie de réduire ses coûts environnementaux à conditions d'adapter progressivement son plan de production. Bien que dans ce cas l'optimisation ne permette plus de diminuer le coût total de la chaîne d'approvisionnement étudiée, les résultats demeurent encourageants du fait de la faible augmentation du coût total des opérations logistiques tandis que les législations se verraient fortement renforcées, jusqu'à hauteur de 60 %.

### **Utilisateurs industriels potentiels**

De manière générale, les entreprises assujetties au SPEDE et étant les plus grosses émettrices de GES au Québec œuvrent dans le secteur de l'énergie (aluminerie, pétrole, fonderie *etc.*) < [http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/etablissements\\_2015\\_SPEDE.pdf](http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/etablissements_2015_SPEDE.pdf) >, consulté le 20 mai 2015. Ainsi, on peut dire que typiquement, les entreprises assujetties à la loi sur la compensation et mettant sur le marché les plus grandes quantités de CEI ne sont pas les plus touchées par la loi sur les limitations de GES.

Cependant, un certain nombre de compagnies contribuent à ces législations sur une base volontaire, afin de donner une bonne image auprès des consommateurs. C'est pourquoi l'outil d'aide à la décision proposé dans ce travail pourrait être utilisé par des entreprises particulièrement touchées par la compensation aux services de collecte. Dans le même temps, elles pourraient agir sur les quantités de CEI qu'elles utilisent et minimiser ainsi les déchets engendrés, tout en allant chercher des réductions d'émissions de GES sans forcément être assujetties à la législation du SPEDE. Les décisions relatives aux changements des politiques d'approvisionnement et de production pourraient être prises en coordination avec le département de marketing afin de s'assurer au préalable de la bonne insertion sur le marché d'une nouvelle gamme de produits verts.

## **Perspectives de recherche**

Malgré les résultats encourageants mis en évidence dans ce travail de recherche, il aurait été intéressant que la totalité des données de la chaîne logistique soient tirées d'un cas concret d'entreprise québécoise assujettie à la loi sur la compensation et au SPEDE. Cependant, nous avons tenté d'utiliser lors de nos expérimentations un maximum de données réelles, tout particulièrement concernant les paramètres associés aux lois environnementales.

De notre point de vue, ce travail de recherche constitue un bon point de départ dans le processus d'aide aux compagnies souhaitant réduire leur facture environnementale tout en améliorant la quantité de déchets des CEI mis sur le marché québécois. Cependant, les pistes de recherche sont encore nombreuses et il pourrait s'avérer intéressant de pousser encore plus loin le travail d'analyse présenté dans ce mémoire. En effet nous avons pu constater que le secteur des transports présente un bon potentiel de réduction des coûts lorsque le poids total des produits transportés diminue. De plus, les transports étant communément reconnus comme le secteur le plus polluant en termes de GES, une diminution significative du nombre de livraisons requises permettrait d'agir de manière positive sur les deux (2) législations simultanément. Ce constat nous pousse à envisager une étude plus poussée au niveau de la consolidation et de l'optimisation du chargement des véhicules de livraisons dans le cadre d'une réduction des poids et volumes des produits transportés. Aussi, l'organisme ÉEQ accorde jusqu'à 20 % de rabais sur la compensation dans le cas où l'entreprise met sur le marché un certain niveau de CEI recyclés post-consommation. Ceci pourrait être intégré dans le modèle d'optimisation présenté dans ce travail. De plus, nous pensons utile d'envisager la programmation stochastique dans la modélisation afin de prendre en considération certaines incertitudes comme la demande des clients.

Enfin, nous avons abordé ce problème d'un point de vue tactique avec un horizon de planification d'une année. Cependant, certains paramètres comme les investissements requis pour l'achat de nouvelles technologies, l'évolution des législations à plus long terme, ou encore les choix relatifs au marketing et aux prix de vente des produits standard versus verts mériteraient d'aborder ce problème d'un point de vue stratégique à plus long terme.

## ANNEXE I

### TARIFICATION POUR LA COMPENSATION EN 2014

Catégories de matières	Sous-catégories de matières	Matières	Contributions annualisées €/kg	Seuil de contenu recyclé postc. à atteindre pour obtenir le crédit <sup>2</sup>
Imprimés		• Encarts et circulaires imprimés sur du papier journal	15,101	80 %
		• Catalogues et publications	22,534	50 %
		• Magazines	22,534	50 %
		• Annuaire téléphoniques	22,534	80 %
		• Papier à usage général	22,534	80 %
		• Autres imprimés		
Contenants et emballages	Papier carton	• Carton ondulé	26,470	n/a
		• Sacs d'emptyes de papier kraft	26,470	100 %
		• Emballages de papier kraft	26,470	100 %
		• Carton plat et autres emballages de papier	16,938	n/a
		• Contenants à pignon	16,295	n/a
		• Laminés de papier	18,199	100 %
		• Contenants aseptiques	28,480	n/a
	Plastiques	• Bouteilles PET	22,027	100 %
		• Bouteilles HDPE	21,741	100 %
		• Plastiques stratifiés	51,781	n/a
		• Pellicules HDPE et LDPE	51,781	n/a
		• Sacs d'emptyes de pellicules HDPE, LDPE et autres	51,781	n/a
		• Polystyrène expansé alimentaire	68,133	n/a
		• Polystyrène expansé de protection	68,133	n/a
		• Polystyrène non expansé	68,133	n/a
		• Contenants PET	26,637	100 %
		• Acide polylactique (PLA)	68,133	n/a
		• Autres plastiques, polymères et polyuréthane	26,637	n/a
	Aluminium	• Contenants pour aliments et breuvages	18,777	n/a
		• Autres contenants et emballages en aluminium		n/a
	Acier	• Bombes aérosol	11,487	n/a
		• Autres contenants en acier		n/a
	Verre	• Verre clair	9,711	n/a
		• Verre coloré	9,441	n/a



## ANNEXE II

### ANALYSE DE SENSIBILITÉ DE LA HAUSSE DU PRIX MOYEN D'ACHAT DES COMPOSANTS AYANT BÉNÉFICIÉ DE L'ÉCOCONCEPTION

hausse acquisition (%)	Production Verte (%)	Production Standard (%)	émissions (tCO2e)	bilan carbone (\$)	Poids de CEI (kg)	compensation (\$)	Cout ACQ (\$)	COÛT TOTAL (\$)
0	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 850 000	7 782 973
1	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 872 490	7 805 463
2	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 894 980	7 827 953
3	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 917 470	7 850 443
4	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 939 960	7 872 933
5	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 962 450	7 895 423
6	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	3 984 940	7 917 913
7	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 007 430	7 940 403
8	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 029 920	7 962 893
9	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 052 410	7 985 383
10	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 074 900	8 007 873
11	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 097 390	8 030 373
12	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 120 000	8 052 973
13	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 142 500	8 075 473
14	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 165 000	8 097 973
15	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 187 500	8 120 473
16	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 210 000	8 142 973
17	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 232 500	8 165 473
18	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 255 000	8 187 973
19	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 277 500	8 210 473
20	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 300 000	8 232 973
21	100	0	258 727	181 580	360 000	153 601	4 322 500	8 255 473
22	98,53	1,47	259 083	176 705	362 052	154 506	4 327 892	8 267 555
23	97,13	2,87	259 429	171 975	364 018	155 373	4 352 646	8 298 679
24	97,13	2,87	259 429	171 975	364 018	155 373	4 374 500	8 320 533
25	97,13	2,87	259 429	171 975	364 018	155 373	4 396 355	8 342 387
26	94,15	5,85	260 166	161 891	368 194	157 214	4 400 759	8 364 149
27	92,64	7,36	260 515	157 121	370 301	158 143	4 412 801	8 385 154
28	89,9	10,1	261 151	148 411	374 158	159 843	4 416 287	8 405 458
29	81,45	18,55	263 173	120 750	385 973	165 053	4 381 446	8 424 557
30	76,13	23,87	264 786	98 694	393 416	168 334	4 363 888	8 442 552
31	69,04	30,96	266 522	74 933	403 350	172 714	4 331 525	8 459 521
32	56,7	43,3	270 945	14 432	420 609	180 323	4 258 299	8 473 786
33	52,44	47,56	272 271	3 712	426 589	182 960	4 239 339	8 486 450
34	48,45	51,55	273 412	19 314	432 165	185 419	4 220 668	8 497 365
35	36,45	63,55	276 207	57 557	448 970	192 828	4 137 046	8 507 669
36	36,45	63,55	276 207	57 557	448 970	192 828	4 145 247	8 515 870
37	29,4	70,6	278 031	82 510	457 471	196 576	4 102 899	8 523 401
38	26,9	73,1	279 041	96 324	462 354	198 729	4 079 912	8 529 891
39	20,7	79,3	280 702	119 037	468 652	202 544	4 031 727	8 535 440
40	11,83	88,17	283 150	152 537	483 445	208 028	3 956 428	8 539 379
41	8,74	91,26	284 055	164 912	487 770	209 935	3 930 585	8 541 628
42	8,2	91,8	284 227	167 269	488 509	210 260	3 927 568	8 543 370
43	6,3	93,7	284 678	173 431	491 167	211 432	3 911 045	8 544 472
44	5,82	94,18	284 799	175 093	491 858	211 737	3 907 577	8 545 647
45	4,45	95,55	285 112	179 369	493 766	212 578	3 895 085	8 546 761
46	4,45	95,55	285 112	179 369	493 766	212 578	3 896 186	8 547 862
47	4,45	95,55	285 112	179 369	493 766	212 578	3 896 968	8 548 634
48	4,45	95,55	285 112	179 369	493 766	212 578	3 898 090	8 549 767
49	3,38	96,62	285 372	182 924	495 273	213 243	3 887 225	8 550 316
50	2,3	97,7	285 603	186 092	496 711	213 877	3 876 426	8 550 818
51	2,3	97,7	285 603	186 092	496 711	213 877	3 876 955	8 551 346
52	1,51	98,49	285 828	189 169	497 884	214 394	3 867 880	8 551 690
53	1,51	98,49	285 828	189 169	497 884	214 394	3 868 020	8 551 750
54	0	100	286 167	193 808	500 000	215 327	3 850 000	8 551 876





### ANNEXE III

#### RENFORCEMENT DES LÉGISLATIONS : VALEURS DES PARAMÈTRES ( $\theta$ , z)

SCÉNARIOS	Tarifs de compensation exigibles (cents / kg)					Prix d'une tCO <sub>2</sub> e
	<i>Carton</i>	<i>Plastique</i>	<i>Aluminium</i>	<i>Acier</i>	<i>Verre</i>	x
<b><i>Base (n+3)</i></b>	26,47	68,13	18,78	9,71	11,49	13,68 \$
<b><i>Base +10% (n+4)</i></b>	29,117	74,943	20,658	10,681	12,639	15,05 \$
<b><i>Base +20% (n+5)</i></b>	31,764	81,756	22,536	11,652	13,788	16,42 \$
<b><i>Base + 30% (n+6)</i></b>	34,411	88,569	24,414	12,623	14,937	17,78 \$
<b><i>Base + 40% (n+7)</i></b>	37,058	95,382	26,292	13,594	16,086	19,15 \$
<b><i>Base + 50% (n+8)</i></b>	39,705	102,195	28,17	14,565	17,235	20,52 \$
<b><i>Base + 60% (n+9)</i></b>	42,352	109,008	30,048	15,536	18,384	21,89 \$



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdallah, T., A. Diabat and D. Simchi-Levi (2010). A carbon sensitive supply chain network problem with green procurement. *Computers and Industrial Engineering (CIE)*, 2010 40th International Conference on, IEEE.
- Abramovic, B., Lovric, I., & Stupalo, V. (2012). Analysis of Intermodal Terminals Service Quality in the Republic of Croatia. *PROMET-Traffic&Transportation*, 253-260.
- Araujo, L. and D. Harrison (2002). "Path dependence, agency and technological evolution." *Technology Analysis & Strategic Management* 14(1): 5-19.
- Arena, U., M. L. Mastellone and F. Perugini (2003). "Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system." *The international journal of life cycle assessment* 8(2): 92-98.
- Atasu, A. and L. N. Van Wassenhove (2010). "Environmental legislation on product take-back and recovery." *Closed-Loop Supply Chains: New Developments to Improve the Sustainability of Business Practices*: 23-28.
- Bansal, P. and B. McKnight (2009). "Looking forward, pushing back and peering sideways: analyzing the sustainability of industrial symbiosis." *Journal of Supply Chain Management* 45(4): 26-37.
- Bauer, C., J. Buchgeister, R. Hischier, W. Poganietz, L. Schebek and J. Warsen (2008). "Towards a framework for life cycle thinking in the assessment of nanotechnology." *Journal of Cleaner Production* 16(8): 910-926.
- Beamon, B. M. (1999). "Measuring supply chain performance." *International Journal of Operations & Production Management* 19(3): 275-292.
- Benjaafar, S., Y. Li and M. Daskin (2013). "Carbon footprint and the management of supply chains: Insights from simple models." *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* 10(1): 99-116.
- Besser, T. L., N. Miller and R. K. Perkins (2006). "For the greater good: business networks and business social responsibility to communities." *Entrepreneurship and regional development* 18(4): 321-339.
- Brandenburg, M., K. Govindan, J. Sarkis and S. Seuring (2014). "Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions." *European Journal of Operational Research* 233(2): 299-312.

- Carter, C. R. and P. L. Easton (2011). "Sustainable supply chain management: evolution and future directions." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 41(1): 46-62.
- Carter, C. R. and D. S. Rogers (2008). "A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory." *International journal of physical distribution & logistics management* 38(5): 360-387.
- Chaabane, A., A. Ramudhin, M. Kharoune and M. Paquet (2011). "Trade-off model for carbon market sensitive green supply chain network design." *International Journal of Operational Research* 10(4): 416-441.
- Chaabane, A., A. Ramudhin and M. Paquet (2012). "Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme." *International Journal of Production Economics* 135(1): 37-49.
- Chen, C. and G. E. Monahan (2010). "Environmental safety stock: The impacts of regulatory and voluntary control policies on production planning, inventory control, and environmental performance." *European Journal of Operational Research* 207(3): 1280-1292.
- Chen, C.-W. and Y. Fan (2012). "Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48(1): 150-164.
- Chen, Y., R. Simon, C. Reich-Weiser and J. Woo (2013). *Green Supply Chain. Green Manufacturing*, Springer: 83-105.
- Cheung, R. K., J. H. Tong and B. Slack (2003). "The transition from freight consolidation to logistics: the case of Hong Kong." *Journal of Transport Geography* 11(4): 245-253.
- Claypool, E., B. A. Norman and K. L. Needy (2014). "Modeling risk in a design for supply chain problem." *Computers & Industrial Engineering*.
- De Benedetto, L. and J. Klemeš (2009). "The Environmental Performance Strategy Map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process.»*Journal of Cleaner Production* 17(10): 900-906.
- De Brito, M. P. and R. Dekker (2003). "Modelling product returns in inventory control exploring the validity of general assumptions." *International Journal of Production Economics* 81: 225-241.
- De Brito, M. P. and T. OTB (2007). "Towards sustainable supply chains: a methodology." *SIMPOI/POMS Proceedings*: 8-10.

- Deloitte & Touche LPP (2012). British Columbia. Balancing opportunities and risks in the global carbon economy. In Pacific Carbon Trust.
- Drake, D., P. Kleindorfer and L. Van Wassenhove (2012). "Technology choice and capacity portfolios under emissions regulation."
- Drumwright, M. E. (1994). "Socially responsible organizational buying: environmental concern as a noneconomic buying criterion." *The Journal of Marketing*: 1-19.
- Duque Ciceri, N., M. Garetti and S. Terzi (2009). Product lifecycle management approach for sustainability. Proceedings of the 19th CIRP Design Conference Competitive Design, Cranfield University Press.
- Duval, D. and H. L. MacLean (2007). "The role of product information in automotive plastics recycling: a financial and life cycle assessment." *Journal of cleaner production* 15(11): 1158-1168.
- Elkington, J. (1998). "Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business." *Environmental Quality Management* 8(1): 37-51.
- Ellram, L. M. and S. P. Siferd (1998). "Total cost of ownership: a key concept in strategic cost management decisions." *Journal of Business Logistics* 19: 55-84.
- Eltantawy, R. A., G. L. Fox and L. Giunipero (2009). "Supply management ethical responsibility: reputation and performance impacts." *Supply Chain Management: An International Journal* 14(2): 99-108.
- Ergun, O., G. Kuyzu and M. Savelsbergh (2007). "Reducing truckload transportation costs through collaboration." *Transportation Science* 41(2): 206-221.
- Fahimnia, B., Sarkis, J., Dehghanian, F., Banihashemi, N., & Rahman, S. (2013). The impact of carbon pricing on a closed-loop supply chain: an Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 59, 210-225.
- Fleischmann, M., J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. Van der Laan, J. A. Van Nunen and L. N. Van Wassenhove (1997). "Quantitative models for reverse logistics: a review." *European journal of operational research* 103(1): 1-17.
- Fleischmann, M., H. R. Krikke, R. Dekker and S. D. P. Flapper (2000). "A characterisation of logistics networks for product recovery." *Omega* 28(6): 653-666.
- Fragnière, A. (2009). *La compensation carbone: illusion ou solution ?* Paris, France, Presses universitaires de France, 207 p. (Collection Développement durable et innovation institutionnelle).

- Fumagalli, L., M. Macchi and M. Rapaccini (2009). Computerized Maintenance Management Systems in SMEs: a survey in Italy and some remarks for the implementation of Condition Based Maintenance. *Information Control Problems in Manufacturing*.
- Garetti, M. and M. Taisch (2012). "Sustainable manufacturing: trends and research challenges." *Production Planning & Control* 23(2-3): 83-104.
- Gerrard, J. and M. Kandlikar (2007). "Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on green innovation and vehicle recovery." *Journal of Cleaner Production* 15(1): 17- 27.
- Gold, S., S. Seuring and P. Beske (2010). "The constructs of sustainable supply chain management—a content analysis based on published case studies." *Progress in Industrial Ecology, An International Journal* 7(2): 114-137.
- Guide Jr, V. D. R., L. Muyldermans and L. N. Van Wassenhove (2005). "Hewlett-Packard company unlocks the value potential from time-sensitive returns." *Interfaces* 35(4): 281-293.
- Guide, V. D. R. and L. N. Wassenhove (2001). "Managing product returns for remanufacturing." *Production and Operations Management* 10(2): 142-155.
- Gungor, A. and S. M. Gupta (1999). "Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey." *Computers & Industrial Engineering* 36(4): 811-853.
- Gunson, A., B. Klein, M. Veiga and S. Dunbar (2010). "Reducing mine water network energy requirements." *Journal of Cleaner Production* 18(13): 1328-1338.
- Hageback, C. and A. Segerstedt (2004). "The need for co-distribution in rural areas—a study of Pajala in Sweden." *International Journal of Production Economics* 89(2): 153-163.
- Hamprecht, J. (2005). *Sustainable purchasing strategy in the food industry*, University of St. Gallen.
- Handfield, R. B., & Nichols, E. L. (1999). "Introduction to supply chain management" Vol. 1. Upper Saddle River, NJ: prentice Hall.
- Harris, I., M. Naim, A. Palmer, A. Potter and C. Mumford (2011). "Assessing the impact of cost optimization based on infrastructure modelling on CO<sub>2</sub> emissions." *International Journal of Production Economics* 131(1): 313-321.
- Hoën, K., T. Tan, J. Fransoo and J. van Houtum (2012). *Effect of Carbon Emission Regulations on Transport Mode Selection under Stochastic Demand*. Flexible

Services and Manufacturing Journal (Published Online, DOI 10.1007/s10696-012-9151-6).

- Holt, D. and A. Ghobadian (2009). "An empirical study of green supply chain management practices amongst UK manufacturers." *Journal of Manufacturing Technology Management* 20(7): 933-956.
- Hu, G. and B. Bidanda (2009). "Modeling sustainable product lifecycle decision support systems." *International Journal of Production Economics* 122(1): 366-375.
- Hugo, A. and E. Pistikopoulos (2005). "Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks." *Journal of Cleaner Production* 13(15): 1471-1491.
- Humphreys, P., Y. Wong and F. Chan (2003). "Integrating environmental criteria into the supplier selection process." *Journal of Materials Processing Technology* 138(1): 349-356.
- Hunkeler, D. and G. Rebitzer (2003). "Life Cycle costing—paving the road to sustainable development?" *The international journal of life cycle assessment* 8(2): 109-110.
- Jaber, M. Y., C. H. Glock and A. M. El Saadany (2013). "Supply chain coordination with emissions reduction incentives." *International Journal of Production Research* 51(1): 69-82.
- Jacobs, B. W., & Subramanian, R. (2012). Sharing responsibility for product recovery across the supply chain. *Production and Operations Management*, 21(1), 85-100.
- Jayaraman, V. (2006). "Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach." *International Journal of Production Research* 44(5): 981-998.
- Kim, S. and B. E. Dale (2002). "Allocation procedure in ethanol production system from corn grain I. system expansion." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 7(4): 237-243.
- Kim, T., Y. Hong\* and J. Lee (2005). "Joint economic production allocation and ordering policies in a supply chain consisting of multiple plants and a single retailer." *International Journal of Production Research* 43(17): 3619-3632.
- Kiritsis, D., V. K. Nguyen and J. Stark (2008). "How closed-loop PLM improves Knowledge Management over the complete product lifecycle and enables the factory of the future." *International Journal of Product Lifecycle Management* 3(1): 54-77.

- Kleindorfer, P. R., K. Singhal and L. N. Wassenhove (2005). "Sustainable operations management." *Production and operations management* 14(4): 482-492.
- Klundert, J. v. d. and L. Wormer (2010). "ASAP: The after-salesman problem." *Manufacturing & Service Operations Management* 12(4): 627-641.
- Kossoy, A., Guigon, P. (2012). *State and Trends of the Carbon Markets 2012*. Washington D.C., World Bank, 138 p.
- Krass, D., T. Nedorezov and A. Ovchinnikov (2013). "Environmental taxes and the choice of green technology." *Production and Operations Management* 22(5): 1035-1055.
- Krause, D. R., S. Vachon and R. D. Klassen (2009). "Special topic forum on sustainable supply chain management: introduction and reflection on the role of purchasing management\*." *Journal of Supply Chain Management* 45(4): 18-25.
- Krikke, H., J. Bloemhof-Ruwaard and L. Van Wassenhove (2003). "Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators." *International journal of production research* 41(16): 3689-3719.
- Krikke, H., A. van Harten and P. Schuur (1999). "Business case Océ: reverse logistic network re-design for copiers." *OR-Spektrum* 21(3): 381-409.
- Kumar, S. and V. Putnam (2008). "Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors." *International Journal of Production Economics* 115(2): 305-315.
- Lam, H. L., P. Varbanov and J. Klemeš (2010). "Minimising carbon footprint of regional biomass supply chains." *Resources, Conservation and Recycling* 54(5): 303-309.
- Lapkin, A., L. Joyce and B. Crittenden (2004). "Framework for evaluating the "greenness" of chemical processes: case studies for a novel VOC recovery technology." *Environmental science & technology* 38(21): 5815-5823.
- Lee, I. and B.-C. Lee (2010). "An investment evaluation of supply chain RFID technologies: A normative modeling approach." *International Journal of Production Economics* 125(2): 313-323.
- Levrat, E., B. Iung and A. Crespo Marquez (2008). "E-maintenance: review and conceptual framework." *Production Planning & Control* 19(4): 408-429.
- Lieckens, K. and N. Vandaele (2007). "Reverse logistics network design with stochastic lead times." *Computers & Operations Research* 34(2): 395-416.



- Lu, L. Y., C. Wu and T.-C. Kuo (2007). "Environmental principles applicable to green supplier evaluation by using multi-objective decision analysis." *International Journal of Production Research* 45(18-19): 4317-4331.
- Maxwell, D. and R. Van der Vorst (2003). "Developing sustainable products and services." *Journal of Cleaner Production* 11(8): 883-895.
- Miemićzyk, J., T. E. Johnsen and M. Macquet (2012). "Sustainable purchasing and supply management: a structured literature review of definitions and measures at the dyad, chain and network levels." *Supply Chain Management: An International Journal* 17(5): 478-496.
- Min, H., H. Jeung Ko and C. Seong Ko (2006). "A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns." *Omega* 34(1): 56-69.
- Min, H. and I. Kim (2012). "Green supply chain research: past, present, and future." *Logistics Research* 4(1-2): 39-47.
- Mollenkopf, D., H. Stolze, W. L. Tate and M. Ueltschy (2010). "Green, lean, and global supply chains." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 40(1/2): 14-41.
- Navin-chandra, D. (1991). "Design for environmentability." *ASME DES ENG DIV PUBL DE*, ASME, NEW YORK, NY,(USA), 1991 31: 119-125.
- Neto, T., J. Carvalho Jr, C. Veras, E. Alvarado, R. Gielow, E. Lincoln, T. Christian, R. Yokelson and J. Santos (2009). "Biomass consumption and CO<sub>2</sub> and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire." *Atmospheric Environment* 43(2): 438-446.
- Nouira, I., Y. Frein and A. B. Hadj-Alouane (2014). "Optimization of manufacturing systems under environmental considerations for a greenness-dependent demand." *International Journal of Production Economics* 150: 188-198.
- Pagell, M. and Z. Wu (2009). "Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies of 10 exemplars." *Journal of supply chain management* 45(2): 37-56.
- Pagell, M., Z. Wu and M. E. Wasserman (2010). "Thinking differently about purchasing portfolios: an assessment of sustainable sourcing." *Journal of Supply Chain Management* 46(1): 57-73.
- Palak, G., S. D. Ekşioğlu and J. Geunes (2014). "Analyzing the impacts of carbon regulatory mechanisms on supplier and mode selection decisions: An application to a biofuel supply chain." *International Journal of Production Economics* 154: 198-216.

- Pan, S., E. Ballot and F. Fontane (2013). "The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains." *International Journal of Production Economics* 143(1): 86-94.
- Papageorgiou, L. G. (2009). "Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities." *Computers & Chemical Engineering* 33(12): 1931-1938.
- Park, H. and L. Stoel (2005). "A model of socially responsible buying/sourcing decision-making processes." *International Journal of Retail & Distribution Management* 33(4): 235-248.
- Park, H.-S., E. R. Rene, S.-M. Choi and A. S. Chiu (2008). "Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea—from spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis." *Journal of Environmental Management* 87(1): 1-13.
- Pinto, J. G. and C. C. Raible (2012). "Past and recent changes in the North Atlantic oscillation." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 3(1): 79-90.
- Pochampally, K. K., S. M. Gupta and K. Govindan (2009). "Metrics for performance measurement of a reverse/closed-loop supply chain." *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling* 1(1): 8-32.
- Preuss, L. (2009). "Addressing sustainable development through public procurement: the case of local government." *Supply Chain Management: An International Journal* 14(3): 213-223.
- Punter, T., R. Kusters, J. Trienekens, T. Bemelmans and A. Brombacher (2004). "The W-Process for software product evaluation: a method for goal-oriented implementation of the ISO 14598 standard." *Software Quality Journal* 12(2): 137-158.
- Radulescu, M., S. Radulescu and C. Z. Radulescu (2009). "Sustainable production technologies which take into account environmental constraints." *European Journal of Operational Research* 193(3): 730-740.
- Ramudhin, A., A. Chaabane and M. Paquet (2010). "Carbon market sensitive sustainable supply chain network design." *International Journal of Management Science and Engineering Management* 5(1): 30-38.
- Ramudhin, A., M. Paquet, A. Artiba, P. Dupré, D. Varvaro and V. Thomson (2008). "A generic framework to support the selection of an RFID-based control system with application to the MRO activities of an aircraft engine manufacturer." *Production Planning and Control* 19(2): 183-196.

- Ravi, V. (2012). "Selection of third-party reverse logistics providers for End-of-Life computers using TOPSIS-AHP based approach." *International Journal of Logistics Systems and Management* 11(1): 24-37.
- Rubio, S., A. Chamorro and F. J. Miranda (2008). "Characteristics of the research on reverse logistics (1995–2005)." *International Journal of Production Research* 46(4): 1099-1120.
- Seuring, S. and S. Gold (2012). "Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management." *Supply Chain Management: An International Journal* 17(5): 544-555.
- Seuring, S. and M. Müller (2008). "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management." *Journal of cleaner production* 16(15): 1699-1710.
- Shaw, K., R. Shankar, S. S. Yadav and L. S. Thakur (2012). "Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain." *Expert Systems with Applications* 39(9): 8182-8192.
- Sheu, J.-B. (2008). "Green supply chain management, reverse logistics and nuclear power generation." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 44(1): 19-46.
- Sheu, J.-B., Y.-H. Chou and C.-C. Hu (2005). "An integrated logistics operational model for green-supply chain management." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 41(4): 287-313.
- Shih, L. H. (2001). "Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan". *Resources, conservation and recycling*, 32(1), 55-72.
- Simpson, D. F. and D. J. Power (2005). "Use the supply relationship to develop lean and green suppliers." *Supply chain management: An international Journal* 10(1): 60- 68.
- Souza, Gilvan C. Sustainable operations and closed-loop supply chains. Business Expert Press, 2012.
- Srivastava, S. K. (2007). "Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review." *International journal of management reviews* 9(1): 53-80.
- Srivastava, S. K. (2008). "Network design for reverse logistics." *Omega* 36(4): 535-548.
- Srivastava, S. K. and R. K. Srivastava (2006). "Managing product returns for reverse logistics." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 36(7): 524-546.

- Subramanian, R., S. Gupta and B. Talbot (2009). "Product design and supply chain coordination under extended producer responsibility." *Production and Operations Management* 18(3): 259-277.
- Tseng, F.-M., Y.-J. Chiu and J.-S. Chen (2009). "Measuring business performance in the high-tech manufacturing industry: a case study of Taiwan's large-sized TFT-LCD panel companies." *Omega* 37(3): 686-697.
- Tseng, M. M. and F. Piller (2003). "The customer centric enterprise-advances in mass customization and personalization."
- Tseng, M. L., Tan, R. R., & Siriban-Manalang, A. B. (2013). Sustainable consumption and production for Asia: sustainability through green design and practice. *Journal of Cleaner Production*, 40, 1-5.
- Von Blottnitz, H. and M. A. Curran (2007). "A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective." *Journal of cleaner production* 15(7): 607-619.
- Walker, H. and S. Brammer (2009). "Sustainable procurement in the United Kingdom public sector." *Supply Chain Management: An International Journal* 14(2): 128-137.
- Wang, F., X. Lai and N. Shi (2011). "A multi-objective optimization for green supply chain network design." *Decision Support Systems* 51(2): 262-269.
- Winebrake, J. J., J. J. Corbett, J. S. Hawker and K. Korfmacher (2008). "Intermodal freight transport in the great lakes: development and application of a great lakes geographic intermodal freight transport model." Rochester, NY, Great Lakes Maritime Research Institute.
- Worthington, I., M. Ram, H. Boyal and M. Shah (2008). "Researching the drivers of socially responsible purchasing: a cross-national study of supplier diversity initiatives." *Journal of Business Ethics* 79(3): 319-331.
- Wu, C.-C. and N.-B. Chang (2004). "Corporate optimal production planning with varying environmental costs: A grey compromise programming approach." *European Journal of Operational Research* 155(1): 68-95.
- Wu, H.-J. and S. C. Dunn (1995). "Environmentally responsible logistics systems." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 25(2): 20- 38.

Zhu, Q. and J. Sarkis (2007). "The moderating effects of institutional pressures on emergent green supply chain practices and performance." *International Journal of Production Research* 45(18-19): 4333-4355.



## SITES WEB CONSULTÉS

[http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/AA\\_V11N6\\_EMBALLAGE\\_EEQ.pdf](http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/AA_V11N6_EMBALLAGE_EEQ.pdf)

<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/>

<http://www.ecoentreprises.qc.ca/>

[http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/applications/tarif\\_2013\\_07\\_12\\_2012\\_VFF.pdf](http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/applications/tarif_2013_07_12_2012_VFF.pdf)

[http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/EEQ\\_RA\\_2013\\_FRA\\_NUM.pdf](http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/EEQ_RA_2013_FRA_NUM.pdf)

<http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/carbone/Systeme-plafonnement-droits-GES.htm>

<http://www.wci-inc.org/fr/>

[www.mddefp.gouv.qc.ca/changements/carbone/WCI.htm](http://www.mddefp.gouv.qc.ca/changements/carbone/WCI.htm)

<http://www.ledevoir.com/economie/actualites-economiques/425715/premieres-encheres-conjointes-du-quebec-et-de-la-californie-les-droits-de-polluer-ont-pris-un-peu-de-valeur>

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/index.asp>

<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/ventes-encheres/2015-02-18/sommaire-des-resultats.pdf>

<http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/Rapport%20de%20consultation%20Tarif%202014%20VFF%20adopt%C3%A9%20WEBV2.pdf>

[http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/tarif/fiche\\_petits\\_generateurs\\_2014\\_vff.pdf](http://www.ecoentreprises.qc.ca/documents/pdf/tarif/fiche_petits_generateurs_2014_vff.pdf)

[http://www.energies-davenir.com/bibliotheque-ea/production\\_energie\\_reseau\\_alimentation/bilan\\_carbone\\_guide\\_facteurs\\_emissions\\_V5.pdf](http://www.energies-davenir.com/bibliotheque-ea/production_energie_reseau_alimentation/bilan_carbone_guide_facteurs_emissions_V5.pdf)

